

研究責任者名 Name	伊藤 悦子 ITOU Etsuko	所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 理論センター
受理番号 Proposal No.	大型 14/15-11	研究課題名 Program title	四次元非可換ゲージ理論における相互作用する共形場の理論の研究

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)

大きく 2 つの研究を行った。

一つは、 $SU(3)N_f=9$  の理論の相構造を調べ、Iwasaki gauge action、naïve Wilson fermion を用いた場合の PCAC 質量をゼロとする格子パラメータを決定した。この研究は、今後  $N_f=9$  理論の赤外固定点の探索の基礎となる重要な研究である。

2 つ目は、固定点近傍のディラトンモードを測定するため、Wilson flow を用いたエネルギー運動量テンソルの測定コードを開発した。これまでゲージ場に対する Wilson flow のコードは構築済みであったが、今年度は、フェルミオン場に対する flow 方程式を解くコードを開発した。それと同時に、ノイズ法を用いてエネルギー運動量テンソルの測定するためのコードも開発した。

(英文)

Mainly, we have done two topics.

Firstly, we determined the lattice parameters where PCAC mass is zero for  $SU(3) N_f=9$  gauge theory. The lattice gauge action is Iwasaki gauge and we utilize the naïve Wilson fermion. This work is a basic study to investigate the existence of infrared fixed point of this  $N_f=9$  theory.

Secondly, we constructed the simulation codes for the Wilson flow of fermions and the measurement of energy-momentum tensor. The motivation of the constructing the codes is based on the dilaton physics, which would be realized near infrared fixed point. Until now, we already had the Wilson-flow code for the gauge fields. This year, we developed it for 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
	2	0	1	1	0

# 実施報告書

- 格子シミュレーションを用いた共形場の理論の研究 -

## 1. 研究組織

研究責任者

伊藤 悦子 (いとう えつこ) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 特任助教

## 2. 当該期間の実施報告の詳細

本研究の目的は、4次元 large flavor 非可換ゲージ理論 (SU( $N_c$ )) の強結合領域の理論のふるまいを調べることである。このような理論は、摂動論的解析を行うと、赤外領域に非自明な相互作用を持つ固定点が存在する (Caswell, 1974)。その固定点近傍で大きな異常次元を持つオペレータが存在する場合、それが標準理論の Higgs セクターを与える理論の候補となったり、未知の複合粒子として低エネルギー領域の物理に影響したりする可能性が高く、標準模型を超えるモデルの候補の一つとして注目されている。また、場の理論としても、4次元で非自明な相互作用をもつ固定点の例は、あまり知られておらず、理論的にも興味深い対象である。

この固定点の存在は、ゲージ群と結合するフェルミオン場の表現や数に依存する。摂動論 2 ループの解析から、基本表現のフェルミオンが存在する SU(3) ゲージ理論の場合は  $8 < N_f \leq 16$  の領域に赤外固定点が存在することが示唆されている。しかし、この固定点での結合定数の値はフレーバー数によっては強結合領域にあり、固定点の存在と固定点近傍での場の理論の摂動論的解析は信頼できないため、非摂動論的な解析が非常に重要である。

SU(3) ゲージ理論の様々なフレーバー数の理論における赤外固定点の存在に関して、これまでの国内外の研究状況を図 1 にまとめた [1, 2]。上記の 4 つの手法に関して、青がその理論に赤外固定点が存在すると主張している一つの独立なグループを表し、一方で赤はその理論に赤外固定点がないと主張しているグループを表した。この状況から、非自明な赤外固定点のあるフレーバー数の下限は、 $N_f \sim 8$  であることがわかってきた。(ただし、 $N_f = 8$  に関しては、未だどのグループもプレリミナリーな結果しか出していない。一方で、Hayakawa *et. al.*[3]、Appelquist *et.al.*[4] らによって、 $N_f = 10$  の場合は赤外固定点が存在する事が、既に本論文として出版されている。)すると、次に疑問なのは、 $N_f = 9$  が赤外固定点を持つか否か、である [5]。

このような背景を踏まえ、今年度は SU(3)  $N_f = 9$  理論の赤外固定点の探索をメインに研究課題を申請した。当初の予定では、主に、

A-1 : Dirac 演算子の固有モード数のスケーリング則の測定

A-2 : step scaling 法による赤外固定点の探索

を行う予定であったが、採択された計算時間が申請時間の半分以下になってしまい、どちらも遂行することが不可能であることがわかった。そこで、今年度は、これらの研究を行うための基礎となる、PCAC 質量の測定から繰り込んだフェルミオンの質量を一定とするホッピングパラメータの決定のためのシミュレーションを行った。

具体的には、Iwasaki gauge action, Wilson fermion を使い、奇数フレーバーのシミュレーションを行うため、rational 近似を用いた Hybrid Monte Carlo シミュレーションを行う。Rational 近似としては、なるべく massless へ近づけるため、Dirac 演算子の固有値を  $\lambda$  とした時、 $10^{-3} < \lambda < 1.0$  で有効になるよう、22 次の多項式展開を用いた。すると、PCAC mass が  $m_{\text{PCAC}} > 0.1$  までは十分

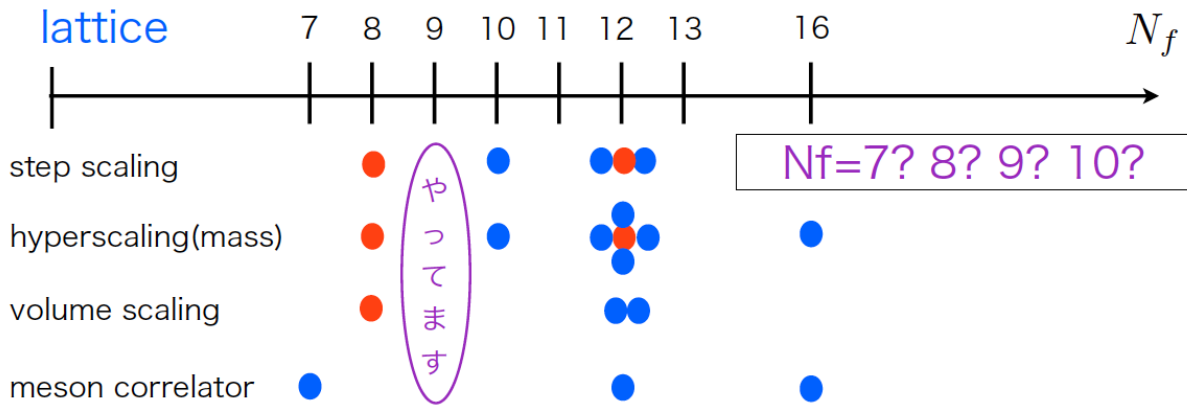


図 1: SU(3) 基本表現のフェルミオン ( $N_f$ ) 理論の最近の研究結果。一つの丸が一つの独立なグループを示す。青がその理論に赤外固定点が存在すると主張しているグループ、赤がその理論に赤外固定点がないと主張しているグループを表す。(第 69 回 日本物理学会年次大会 企画講演「格子ゲージ理論による新物理模型の非摂動的的研究」登壇者：伊藤悦子のスライドより。)

この近似で良いことを既に測定して確認した。

格子サイズは、 $(L/a)^3 \times 2L/a$  で、 $L/a = 8, 10, 12$  で終了させた。 $\beta$  の領域は、 $1.8 \leq \beta \leq 4.0$  とし、その間に 5 点測定を行った。ちなみに、昨年度までに  $\beta \leq 1.8$  では、バルク相が出現することが分かっている。以上の格子セットアップを用いて、各  $\beta, L/a$  に対して、ホッピングパラメータを 4-5 点とり、PCAC 質量を測り、 $m_{\text{PCAC}} = 0$  となる  $\kappa_c$  を求めた。

その結果をまとめると、表 1 となった。今後、SU(3)  $N_f = 9$  ゲージ理論の赤外固定点の探索を

$\beta$	$8^3 \times 16$	$10^3 \times 20$	$12^3 \times 24$
1.80	0.1564(47)	0.1564(172)	0.1564(70)
2.00	0.1534(64)	0.1522(105)	0.1522(62)
2.50	0.1465(45)	0.1457(92)	0.1455(78)
3.00	0.1428(52)	0.1419(34)	0.1414(17)
4.00	0.1380(1)	0.1372(59)	0.1366(1)

表 1: 各  $\beta, L/a$  における  $\kappa_c$  の値

行う時、このパラメータ決定が非常に有用になる。

また、来年度以降を見据え、少ない計算時間で新奇性のある研究を行うため、fermion 場に対する Wilson flow のコード開発を行った。この目標は、昨年来申請書等書いているように、フェルミオンに僅かな質量項を加えることで起こるスケール不変性の破れによって現れる「ディラトン・モード」の測定を、最近開発された Wilson flow を用いて模索する計画である。昨年度は、計算機のシミュレーション時間が足りなかったため、実施するのを中止した。しかしながら、昨年度は、Wilson flow を

用いた新しい物理量の導出のための準備として有限温度の quenched QCD についてのシミュレーションを行い、これは論文 [6] として出版した。(参考文献に数値の間違いがあったため、今年度、修正された値を用いて解析しなおし、Errata を出版した。)

この目標と成果を踏まえ、今年度は、約半年に渡り、Luescher によって提案された fermion に対する Wilson flow のコードを構築した。測定したいフェルミオンを含む演算子によって、fermion の Wilson flow は adjoint flow と呼ばれる、flow time を逆に解く方法が提案されている [7]。この adjoint flow とノイズ法を組み合わせ、fermion 場を含むゲージ理論のエネルギー運動量テンソルを測定するコードを構築した。そのコードを  $N_f = 2 + 1$  QCD に対してテストした結果は、Lattice 国際会議で発表した [8]。

## 参考文献

- [1] E. Itou, PoS (Lattice 2013) 005, arXiv:1311.2676 [hep-lat].
- [2] J. Kuti, PoS (Lattice 2013) 004
- [3] M. Hayakawa, K. -I. Ishikawa, Y. Osaki, S. Takeda, S. Uno and N. Yamada, Phys. Rev. D **83**, 074509 (2011)
- [4] T. Appelquist, R. C. Brower, M. I. Buchoff, M. Cheng, S. D. Cohen, G. T. Fleming, J. Kiskis and M. Lin *et al.*, arXiv:1204.6000 [hep-ph].
- [5] E. Itou and A. Tomiya, arXiv:1411.1155 [hep-lat].
- [6] M. Asakawa *et al.* [FlowQCD Collaboration], Phys. Rev. D **90**, no. 1, 011501 (2014) [Phys. Rev. D **92**, no. 5, 059902 (2015)] doi:10.1103/PhysRevD.90.011501, 10.1103/PhysRevD.92.059902 [arXiv:1312.7492 [hep-lat]].
- [7] M. Luscher, JHEP **1304**, 123 (2013) doi:10.1007/JHEP04(2013)123 [arXiv:1302.5246 [hep-lat]].
- [8] E. Itou, H. Suzuki, Y. Taniguchi and T. Umeda, arXiv:1511.03009 [hep-lat].