

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月18日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740173

研究課題名（和文） 四次元非可換ゲージ理論における非自明な赤外固定点の探索

研究課題名（英文） Search for the infrared fixed point of 4-dimensional gauge theory

研究代表者

伊藤 悦子 (ITOU ETSUKO)

大学共同利用機関法人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

研究者番号：50432464

研究成果の概要（和文）：四次元の大きなフレーバー数を持つ非可換ゲージ理論の強結合領域での理論の振る舞いを格子シミュレーションを用いて調べた。特に 12 個の質量ゼロのフェルミオンが結合する SU(3)ゲージ理論について、非摂動的な手法を用いて結合定数のエネルギー依存性を測定した。この理論は、摂動論の解析によると非自明な相互作用を持つ赤外固定点の存在が示唆されている。しかし、その予言は、結合定数の非接道領域にある。そこで、非摂動的にこのような固定点が存在するかどうかを示す必要があった。私は、格子シミュレーションを用いてこれを調べ、その結果、強結合領域に非自明な相互作用をもつ固定点が見つかった。さらに、この理論の固定点周りでの普遍量を調べ、理論的な性質を明らかにしつつ、低エネルギー領域の物理に対する影響を考察した。

研究成果の概要（英文）：We have studied the low energy behavior of 4-dimensional many flavor non-abelian gauge theory. We focus on the SU(3) gauge theory coupled to 12 massless fermions. We measured the nonperturbative running coupling constant using the lattice numerical simulation. According to the perturbative two loop analysis, the Nf=12 SU(3) gauge theory might have a conformal fixed point in the infrared region. However, the coupling constant at the fixed point is large in the perturbative analysis, so that some nonperturbative studies are needed. We measured one of nonperturbative renormalization coupling constant and finally found that there is a nontrivial conformal fixed point in the SU(3) Nf=12 theory. The numerical simulation also derives the critical exponent around the fixed point.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：非摂動的くりこみ、格子シミュレーション、共形場の理論

## 1. 研究開始当初の背景

現在の素粒子標準理論では、物質に質量を与えるヒッグス粒子は、それ以上分割できない基本的なスカラー場として記述されている。

しかし、4次元スカラー場の理論では、スカラー場の自己相互作用ポテンシャルの安定性の問題や、低エネルギー領域ではすべての相互作用がなくなるトリビアルティの問題

があり、これらの解決は重要な問題の一つとなっている。これに対する一つの有力な解決法として、高エネルギー領域では標準模型以外のゲージ理論が存在し、ヒッグス粒子は、その相互作用を通じて生じる複合粒子とするモデルが提唱されており、その現象論的研究が活発にされている。そのモデルでは、前提として、4次元で赤外領域に非自明な固定点が存在し、そこでは場が大きな異常次元を持つ理論が存在する事が仮定されている。本申請の目的は、この高エネルギー領域で仮定されている、4次元で赤外固定点を持つ理論の有力な候補である、大きなフレーバー数(Nf)を持つSU(N)ゲージ理論を非摂動的に調べる事である。場の理論全体をみても、4次元において非自明な固定点を持つ理論は、これ以外にはほとんど知られておらず、理論的観点からも非常に興味深い。

この固定点の存在は、摂動的解析により、Caswellによって初めて示唆された。そして、その固定点の有無は、理論のゲージ群と結合するフェルミオン場の表現と数に依存する。SU(3)ゲージ理論の場合、基本表現のフェルミオンの結合を考えると、摂動論2ループの解析では $8 < N_f \leq 16$ の領域に赤外固定点が存在する。しかし、この固定点での結合定数の値は、Nfの値によっては強結合領域にあり、摂動的解析は信頼できない。従って、非摂動的にこの固定点の存在を確かめ、固定点近傍での場の理論の性質を調べることは非常に重要な研究課題となっていた。

この理論に関連し、格子シミュレーションを用いた当時の他の研究グループの現状としては、まず格子上のくりこみスキームの一つである「シュレディンガー汎関数(SF)スキーム」を用いて結合定数のエネルギー依存性が測定された。その結果、Nf=8の時は固定点の存在するシグナルは見られなかったが、Nf=12の時は低エネルギー領域で結合定数が一定の値に近づき、固定点が存在するようにみえた。しかし一方で、別のグループは、同じNf=12の理論の相構造を調べ、カイラル対称性が回復する相が見当たらなかったと報告していた。他にもいくつかのグループが、この固定点の存在について研究していたが、特にNf=12については一致した結論がでていない状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、四次元の大きなフレーバー数を持つ非可換(SU(N))ゲージ理論の強結合領域の理論のふるまいを調べる事である。特に、このような理論に赤外固定点が存在するかを非摂動的な格子シミュレーション

を用いて調べる。また、固定点が存在した場合、その固定点上の共形場の理論の性質、理論の相構造を調べ、低エネルギー理論に対する影響を考察し、この理論が素粒子標準模型のヒッグスセクターの起源になりうるか調べる。

## 3. 研究の方法

固定点を持つ可能性のある大きなフレーバー数を持つSU(N)ゲージ理論の固定点の存在を、格子ゲージ理論に基づくシミュレーションを用いて調べる。この格子シミュレーションの方法は、時空を格子化する事で第一原理から物理量を非摂動的に計算でき、理論に対する実験的役割を担い、標準理論を超える模型の構築に予言を与える。

ステップスケーリングの方法に従い結合定数のエネルギー依存性を測定し、理論に非自明な相互作用を持つ固定点が存在するかを調べる。ここで、ステップスケーリングの方法とは、まず、ある一定の繰り込んだ結合定数を与える格子パラメータの組(L/a, beta)から、それぞれbetaを固定し、格子サイズをs倍した時の繰り込んだ結合定数を再び測定する。そして、これを繰り返して、エネルギースケールを1/s倍したときの結合定数を階段状に測る、という手法である。その際、本研究の特徴は、格子上のくりこみスキームとして、「ツイステッド・ポリヤコフ・ループ(TPL)スキーム」を用いる事である。このスキームのくりこんだ結合定数は、格子の境界条件で2つの方向に関しリンク変数のツイストを行い、ツイストした方向のポリヤコフ・ループの相関関数とツイストしていない方向のポリヤコフ・ループの相関関数の比を取る事で定義される。このため、 $O(a/L)$ の離散化誤差が相殺し、比較的小さい系統誤差を与えると予測されるのが利点である。

## 4. 研究成果

本研究成果は大きく3つの点である。一つは、ツイストした格子ゲージ理論における相構造を調べた事。もう一つは非摂動的結合定数を数値シミュレーションで測定し、統計誤差、系統誤差を考慮しても赤外固定点が存在することを示した事。最後に、ディラック演算子の固有値を測定し、カイラル対称性も回復していることを示した事である。

### (1) 相構造について。

格子ゲージ理論の研究において、格子状の場の理論としての相構造を理解しておくことは重要なステップである。特に、研究期間中に他のグループによって、

スタaggerドフェルミオンに新しいアーティファクト相の存在が報告され、その相ではカイラル対称性が弱く破れることが知られた。

アーティファクト相の存在は、格子ゲージ作用の選び方の詳細に依存するため、それぞれの格子作用で調べる必要がある。そして、連続場の理論の物理に対する予言は、そのアーティファクト相に入っていない所で行われるべきである。

そのため、私は、最初に自分の格子ゲージセットアップにおける、結合定数とフェルミオンの質量を変化させた時の相構造を調べた。すると、図1に示すように質量がゼロの近くでは、バルク相転移と思われる相転移があることが分かった。

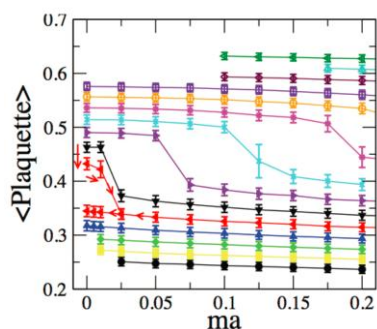


図1 プラケットの  $\beta$ - $ma$  依存性。色の違いは  $\beta$  の違いを示す。

赤のラインは、 $\beta=3.8$  のデータを示している。この時、 $ma$  の小さい領域では、 $\beta=4.0$  (黒) の質量ゼロの配位から、 $\beta=3.8$  の配位を作った時と、 $\beta=3.8$  に止めたまま、質量の大きい方から小さい方へパラメータを変化させた時で値が異なるヒステリシスが見られることを発見した。

そして、それぞれの相でポリヤコフ・ループを測定すると、図の上の相ではポリヤコフ・ループの大きさがノンゼロだが、下の相ではポリヤコフ・ループがほぼゼロであり、図の上が非閉じ込め相、下が閉じ込め相になっていることが分かった。

格子サイズを変えてもこれが現れる  $\beta$  の値は変化しなかったため、これは格子化したことによるアーティファクトから生じるバルクの相転移であると考えられる。

### (2) 結合定数の測定について。

SU(3) Nf=12 理論の赤外固定点の存在を調べるために、非摂動論的な結合定数の測定を行い、固定点が存在することを示した。

研究期間中に、他のグループも同様な研究を行っていたが、その結果は矛盾するもので

あった。私は、その原因が連続極限への外挿の系統誤差によるのではないかと考え、それらを見積もっても、はっきりと固定点が存在することを示した。

図2がその結果である。横軸は結合定数の大きさと、縦軸はその結合定数をインプットとして理論のエネルギースケールを1.5倍下げた時の結合定数の成長率を示す。

格子データが縦軸の1のラインを横切っている  $u$  の値が、固定点での結合定数の値を表す。

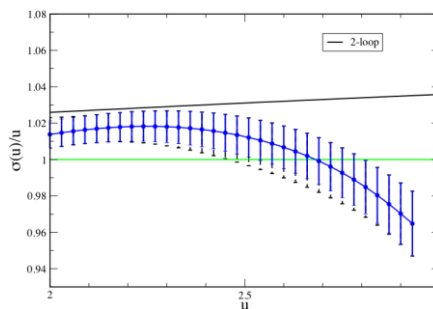


図2 結合定数の成長率の様子。

### (3) カイラル対称性について。

赤外領域に固定点が存在する場合、そこではスケール不変性がある。すると、スケールを出すカイラル凝縮はゼロのはずであり、カイラル対称性は破れていないと考えられる。研究期間中に、他の研究グループがこの理論のカイラル対称性の破れのシグナルを発見していたが、それはアーティファクト相の可能性もあることも指摘された。

そこで、私も自分のデータを用いてカイラル対称性を調べた所、カイラル対称性は破れておらず、結合定数の研究で固定点が存在することをサポートする結果を得た。

図3はディラック演算子の固有値を示す。低い  $\beta$  の値でも、最低固有値がゼロになっていないことがカイラル対称性が破れていないことの一つの証拠となっている。

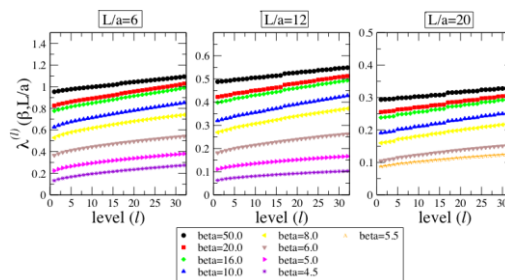


図3 ディラック演算子の固有値分布の例

## 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 3 件)

- ① Etsuko Itou,  
“Properties of the twisted Polyakov loop coupling and the infrared fixed point in the SU(3) gauge theories”  
Progress of Theoretical and Experimental Physics に掲載決定  
査読有り  
<http://arxiv.org/abs/arXiv:1212.1353>
- ② Kenji Ogawa, Tatsumi Aoyama, Hiroaki Ikeda, Etsuko Itou, Masafumi Kurachi, 他 6 名  
“The Infrared behavior of SU(3) Nf=12 gauge theory -about the existence of conformal fixed point-”  
PoS Lattice2011:081,2011  
査読有り  
<http://arxiv.org/abs/arXiv:1111.1575>
- ③ Etsuko Itou, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, 他 6 名  
“Search for the IR fixed point in the Twisted Polyakov Loop scheme (II)”  
PoS Lattice2010:054,2010  
査読有り  
<http://arxiv.org/abs/arXiv:1011.0516>

[学会発表] (計 10 件)

- ① Etsuko Itou  
“Properties of the twisted Polyakov loop coupling and the infrared fixed point in the SU(3) gauge theory”  
Lattice BSM Workshop, Origin of Mass 2013 (招待講演 発表確定)  
2013 年 08 月 05 日～2013 年 08 月 09 日  
Odense, Denmark
- ② Etsuko Itou  
“The twisted Polyakov Loop Coupling and the Search for an IR Fixed Point”  
the 31st International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013) (招待講演 発表確定)  
2013 年 07 月 29 日～2013 年 08 月 03 日  
Mainz, Germany
- ③ 伊藤悦子  
「SU(3) Nf=12 理論の赤外固定点における臨界指数について」  
日本物理学会 第 67 回年次大会  
2012 年 3 月 25 日 関西学院大学
- ④ Etsuko Itou  
“Study on the conformal window using the lattice simulation”  
HPCI戦略プログラム分野5研究会 「計算的手法による素粒子論研究の広がり」(招

待講演)

2011 年 12 月 21 日 高エネルギー加速器研究機構

- ⑤ Etsuko Itou  
“Conformal fixed point of SU(3) gauge theory with 12 fundamental massless fermions”  
Lattice Meets Experiment 2011: Beyond the Standard Model, (招待講演)  
2011 年 10 月 15 日 Fermi 研究所, USA
- ⑥ 伊藤悦子  
「Large flavor QCD における赤外固定点の存在と擬スカラー粒子の異常次元の計算」  
日本物理学会 2011 年秋季大会  
2011 年 9 月 17 日 弘前大学
- ⑦ Etsuko Itou  
“Infrared fixed point for many flavor SU(N) gauge theory”  
Renormalization Group Approach from Ultra Cold Atoms to the Hot QGP  
2011 年 8 月 25 日 京都大学 基礎物理学研究所
- ⑧ 伊藤悦子  
「SU(3)ゲージ理論における赤外固定点の存在と擬スカラー演算子の異常次元の計算」  
基研研究会「場の理論と弦理論」  
2011 年 7 月 27 日 京都大学 基礎物理学研究所
- ⑨ Etsuko Itou  
“The IR behavior of a large flavor gauge theory”  
Workshop on lattice simulation for physics beyond the Standard Model (招待講演)  
2010 年 11 月 12 日 NCTS, Taiwan (新竹市)
- ⑩ Etsuko Itou  
“Search for the IR fixed point in the Twisted Polyakov Loop scheme (II)”  
28th International Symposium On Lattice Field Theory (Lattice 2010)  
2010 年 6 月 15 日 Villasimius, Sardinia, Italy

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 悦子 (ITOU ETSUKO)  
大学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  
研究者番号：50432464