

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540275

研究課題名(和文) 共形ゲージ理論のくり込み群による非摂動的解析の研究

研究課題名(英文) Non-perturbative analysis of conformal gauge theories by renormalization group

研究代表者

寺尾 治彦 (TERAO, Haruhiko)

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号：40192653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：QCDのクォークフレーバー数が、コンフォーマルウィンドウと呼ばれる範囲にあると、スケール不変な理論が実現すると考えられている。本研究ではコンフォーマルウィンドウ近傍のQCDに対して、非摂動的繰り込み群を定式化し、そのダイナミクスの解析を行った。具体的には、格子ゲージ理論のシミュレーション結果との比較を念頭にSU(3)QCD、およびSU(2)QCDについてある近似の下ではあるが非摂動的くり込み群方程式を導出し、ベータ関数の評価に加えて、コンフォーマルウィンドウ内でクォーク質量の異常次元の評価を行った。また、スケーリング則についても、カイラルオーダーパラメータに対するくり込み群を用いて考察した。

研究成果の概要(英文)：It is widely expected that QCD with many quark flavors realizes a scale invariant quantum theory, when the number of flavors lies in the region called the conformal window. In this study we first formulated a set of non-perturbative renormalization group equations for QCD with many flavors, and analyzed the dynamics near the conformal window by solving the equations. Explicitly we evaluated the beta functions and the mass anomalous dimensions for the SU(3) and the SU(2) QCD theories with many flavors. We also examined the scaling law of mass parameters by deriving the renormalization group equations for the chiral order parameters.

研究分野：素粒子論

キーワード：くり込み群 カイラル対称性 強都合ゲージ理論

1. 研究開始当初の背景

QCD のフレーバー数がコンフォーマルウィンドウと呼ばれる範囲にあると、量子論的にスケール不変な理論が実現する¹⁾。ウィンドウの境界近傍の理論のダイナミクスは近似的にスケール不変な挙動を示し QCD とは大きく異なる。そのため、素粒子の標準理論のヒッグスセクターの微調整問題を解決する可能性であるコンフォーマルテクニカラー²⁾のダイナミクスとして議論される。一方、近年は格子ゲージ理論の計算機シミュレーションが精力的に試みられており³⁾、大いに関心を集めている。

一方、最近 D.B.Kaplan 達はスケール不変性が自発的に破れる系でのベータ関数の挙動について一般的に考察し、赤外と紫外の固定点がコンフォーマルウィンドウの端点で交わり消滅することを示唆した⁴⁾。ところが、コンフォーマルウィンドウの端点近傍では強結合系となるため解析が難しく、例えばどのようにスケール不変性が破れるかといった基本的なことも良く分かっていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、コンフォーマルウィンドウ近傍でのダイナミクスについて、非摂動的繰り込み群を用いた解析を進める。スケール不変性の破れは強結合ゲージ相互作用でのカイラル対称性の自発的破れによって引き起こされると考えられ、またスケール不変な理論を扱うためウィルソン流繰り込み群を用いた方法が特に有効である⁵⁾。

格子ゲージ理論の計算機シミュレーションとの比較も念頭におき、具体的に SU(3) QCD、および SU(2) QCD に対して非摂動

繰り込み群方程式を導出する。その結果、RG flow が作る renormalized trajectory から連続極限のベータ関数を導出する。

さらに、コンフォーマルウィンドウの端点におけるスケール不変性の破れに特徴的なスケーリング則について、非摂動的ベータ関数から得られる評価と、直接非摂動的繰り込み群によって得られるオーダーパラメータのスケーリングとの比較を行う。これらの結果は、格子シミュレーションと比較できるものであり興味深い。また、この解析は容易に種々の表現のクォークの系に拡張でき、そのような方向の研究へも発展させられる。また、オーダーパラメータの評価と関係して、湯川相互作用が共存するスケール不変な系のダイナミクスの解析も行うことができる。これと関連して、特にコンフォーマルテクニカラー理論で標準理論の精密測定で制限されている W, Z ボゾンへの輻射補正の S, T パラメータの評価を行うことも課題として挙げた。

3. 研究の方法

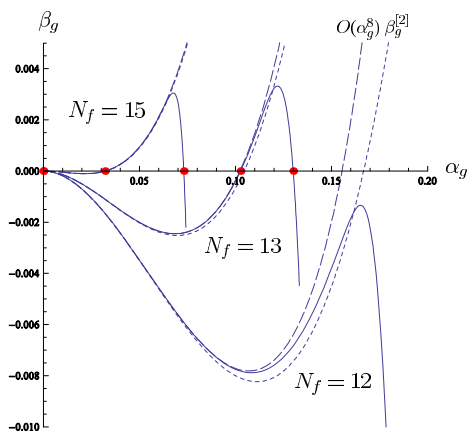
これらの研究のベースになっているものは、カラーとフレーバー自由度の双方を反映したウィルソン流の繰り込み群方程式である。特に、カイラル対称性の自発的破れを記述する 4 フェルミ相互作用のみならず、ゲージ結合定数に対する非摂動的補正を取りこんだ定式化が特色である。

格子ゲージ理論の計算機シミュレーションの結果に対して、ある近似の下での非摂動的繰り込み群方程式の解析をしかも数値的に行うとはいえ、結果を比較することによりその理論的なサポートを与えることを目指す試みである。

4. 研究成果

以下、この研究期間の直前に行った先行研究による成果も含めて記載する。

- (1) 先ず、カラーとフレーバーの双方の自由度を取り入れた非摂動繰り込み群を large N 極限で定式化した。この方程式から RG flow を解析し連続極限を取ることにより、非摂動的なベータ関数を得ることができることを示した。その結果、コンフォーマルウィンドウ内でのベータ関数には図のように赤外に加え紫外固定点が存在し、これらがウィンドウ境界で対消滅を起こすことにより、連続的に QCD のベータ関数に繋がることを示すことができた⁶⁾。この関数の振舞いは摂動展開では得られず、非摂動的な効果が本質的である。この結果は国際会議「Exact Renormalization Group 2010」及び「Renormalization Group Approach from Ultra Cold Atoms to the Hot QGP」でも報告した。



- (2) 格子ゲージ理論のシミュレーション結果との比較を念頭に、具体的にSU(3) QCD、およびSU(2) QCDについてのくり込み群方程式を有限のカラー及びフレーバー数に対して導出した。これを元に

非摂動的ベータ関数の評価し、コンフォーマルウィンドウや固定点での異常次元の評価を行った。また、研究目的に掲げるスケーリング則についても、カイラルオーダーパラメータに対するくり込み群を考察することにより、一定の結果を得た。これらの研究成果については、国際会議「KMI Workshop on "Conformality in Strong Coupling Gauge Theories at LHC and Lattice"」、 「Exact Renormalization Group 2012」において報告した。

- (3) LHC において Higgs 粒子が発見され、その質量が 125GeV とかなり小さいことが分かった。このことは、Higgs 粒子が複合粒子でないことを示唆していると思われる。一方、Higgs ポテンシャルの不安定性の問題が注目された。そこで、研究の方向を変更し、摂動的くり込み群を用いて評価される Higgs 有効ポテンシャルを非摂動くり込み群の観点から関係を明らかにし、また摂動的くり込み群を用いる方法の信頼性について考察する研究を行った。この研究は、Higgs-Yukawa 系の非摂動的解析であり、当初の QCD のカイラル相構造の解析とも関係している。この研究結果は、2013年、2014年の日本物理学会で報告した。

引用文献

- 1) T.Banks, A.Zaks, Nucl. Phys. **B196**, 189 (1982).
- 3) V.A.Miransky, Nuovo Cim. **A90**, 149 (1985); V.A.Miransky, K.Yamawaki, Phys. Rev. **D55**, 5051 (1997).
- 3) T.Appelquist et al. Phys. Rev. Lett.

104, 071601 (2010); Phys. Rev. Lett. **100**, 171607 (2008).

4)D.B. Kaplan, J.W. Lee, D.T. Son, M.A. Stephanov, Int. J. Mod. Phys. **A25**, 422 (2010).

5)K. I. Aoki et al., Prog. Theor. Phys. **97**, 479 (1997); **102**, 1151 (1999); Phys. Rev. **D61**, 045008 (2000).

6)Y. Kusafuka and H. Terao, Phys. Rev. **D84**, 125006 (2011).

5. 主な発表論文等

〔学術論文〕

なし

〔学会発表〕(計5件)

中村衣里子, 東山愛, 寺尾治彦, パラメータ共鳴現象の汎関数繰り込み群を用いた非摂動的解析, 日本物理学会 2014 年秋季大会(佐賀大学), 2014 年 9 月 21 日.

東山愛, 中村衣里子, 寺尾治彦, 非平衡系の汎関数繰り込み群の定式化と力学的繰り込み群との関係について, 日本物理学会 2014 年秋季大会(佐賀大学), 2014 年 9 月 21 日.

大野香穂, 寺尾治彦, Higgs 有効ポテンシャルの汎関数繰り込み群による評価について, 日本物理学会 2014 年秋季大会(佐賀大学) 2014 年 9 月 21 日.

北見友里, 寺尾治彦, 繰り込み群を用いた有効ポテンシャルの改善について 日本物理学会 2013 年秋季大会(高知大学) 2013 年 9 月 23 日.

寺尾治彦, Nonperturbative analyses of nearly conformal gauge theories.

Exact Renormalization Group 2012

Aussois, France, 2012 年 9 月 6 日.

〔図書〕(計1件)

寺尾治彦、群と場の量子論、「数理科学」2013 年 7 月号 NO.601, 特集「群と物理学」, 40-45.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺尾 治彦 (TERAO, Haruhiko)

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号: 40192653