

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800147

研究課題名(和文) 新たな格子離散化法で探る高エネルギー物理のフロンティア

研究課題名(英文) Research on frontiers of high energy physics based on the novel lattice formulations

研究代表者

三角 樹弘 (Misumi, Tatsuhiro)

秋田大学・工学資源学研究科・講師

研究者番号：80715152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理においては未だに解析が困難な非摂動領域と呼ばれるパラメータ領域が存在し、この解析の成功なくしては真の素粒子現象の理解は得られない。本研究では、新しく開発された解析法に基づいて、素粒子物理におけるいくつかの課題の解決を目指す。具体的には、格子Z3-QCD模型という理論を用いて原子核を構成する原因となる「閉じ込め現象」と物質に質量を与える原因となる「カイラル対称性の破れ」という2つの現象が強く結びついていることを示した。また、Adjoint QCDという理論を特殊な空間上で解析することで、Bion閉じ込めという近年提唱された閉じ込め機構が現実の世界でも実現する可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：In quantum field theory describing phenomena of particle physics, there exists a parameter region called the "non-perturbative region", in which a valid method of analysis is still unknown. The analysis of this region is essential for understanding particle physics. In this work, we aim at resolving several problems of non-perturbative physics by using newly developed methods: We have shown the deep connection between the two different non-perturbative phenomena, "confinement" that contributes to the existence of nuclei and "chiral symmetry breaking" that contributes to the existence of mass, based on the lattice Z3-QCD model which is one of the modified models of quantum chromodynamics. We have also shown that the confining mechanism called "bion confinement" can play a significant role in particle physics, by investigating Adjoint QCD on compactified spacetime which is one of the modified versions of realistic particle physics theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：QCD 格子理論 有限温度 中心対称性 ソリトン インスタントン 摂動計算 Resurgence

1. 研究開始当初の背景

素粒子標準理論はヒッグス粒子発見により定性的には確立されたと言えるが、理論パラメータの精密決定や新物理の探索、さらには宇宙の歴史を解明するためには、強い相互作用 (QCD) の寄与を非摂動的に計算する必要がある。中でもQCDにおける「クォーク閉じ込め」と「カイラル対称性の自発的破れ」は強い相互作用の本質的特徴であり、未だに両者の関連性の理解、閉じ込め現象のメカニズムの解明、非摂動的計算手法の確立には至っていない。

(1)閉じ込め転移とカイラル転移の関係性

「閉じ込め」と「カイラル対称性の自発的破れ」の相関を理解することは、QCDの本質的理解に繋がるだけでなく、宇宙の発展過程を理解する上でも重要である。一見別物であるこの2つの現象の繋がり、実は有限温度での振舞を見ることで解明出来る可能性がある。実際、有限温度においては、閉じ込めが消滅しカイラル対称性が回復する高温相が存在すると考えられ、非閉じ込め転移とカイラル転移が同温度で起こると考えられている [Kogut, et. al., PRL50:393 図1左上]。

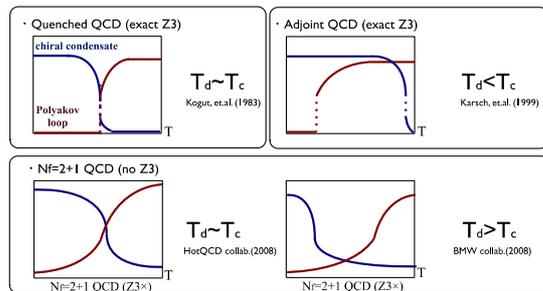


図1: 閉じ込め転移とカイラル転移の温度依存性。グループによってさまざまな結果が出ている。

しかし現実のQCDでは、「閉じ込めに付随するZ3中心対称性」と「カイラル対称性」があらわに破れているため、2つの転移は近似的相転移(Crossover)であり、本質的に2つの現象に関係があるか判然としない。実際、格子QCD計算によると、同温度転移 [Bazavov, arXiv:1303.6294 図1左下] とそうでない結果 [Fodor, et. al., arXiv:0908.3341 図1右上・右下] があり一致した見解が得られていない。この不定性は上記2つの対称性が近似的なものであることに起因する。したがってこの問題に答えるには、理想的な状況として2つの対称性が厳密なQCD型理論での格子計算を行う必要がある。しかし、一般にZ3中心対称性は基本表現クォークの存在により破れてしまうため、大胆なアイデアが必要であった。

(2)閉じ込めのメカニズム

一方、核子ひいては原子核を構成する原因となるクォーク閉じ込めのメカニズムも未だ理解出来ていない。コンパクト化された時空上でのAdjoint QCDと呼ばれる特殊なゲージ理論は、クォーク閉じ込めに深く関わる中心対称性を厳密に保っており、有限温度QCD、素粒子現象論、閉じ込め機構など広い分野で重要な役割を果たす。また、この理論ではBion配位と呼ばれる特殊な複合ソリトン配位による閉じ込め現象が発見されており、ゲージ理論の非摂動的側面の理解へ向けた重要なトピックになっている。

(3)半古典近似による量子非摂動計算法

これらに関係するトピックとして、近年、量子力学・場の量子論の理論的研究において、dilute-gas近似を越えたソリトン (インスタントン)の複合状態が改めて注目を集め、その研究に基づいて量子非摂動現象への新たな知見が蓄積し始めている。特にコンパクト化された時空上の量子色力学や次元シグマ模型においては、「Bion」と呼ばれる複合分数インスタントン配位の振幅を考慮に入れることで、摂動展開の発散に関係したIR-renormalon問題を解決し得ることが示唆されている [Argyres-Unsal (2012)]。

2. 研究の目的

(1)閉じ込め転移とカイラル転移の関係性

虚化学ポテンシャルを3つのフレーバーに均等(2/3ずつ)に導入した場合には、Z3中心対称性とカイラル対称性が同時に保たれることが判明した。このような定式化は Z3-twisted境界条件とも呼ばれ

[H.Kouno, et. al., arXiv:1202.5584]、カイラル対称性を保ったままZ3中心対称性を保つ格子作用になっており、上述の転移温度問題に非常に適した定式化になっている。本研究では、この定式化を用いて有限温度格子数値計算を行い、閉じ込め転移とカイラル転移の関係性について新しい知見を得ることを一つの目的とする。

(2)閉じ込めのメカニズム

コンパクト化された時空上のAdjoint QCDにおいては分数インスタントンと反分数インスタントンが共存する特殊な配位が原因となってクォーク閉じ込めが起きる。本研究では、この閉じ込め機構がコンパクト化半径を無限大にする極限、つまり現実のQCDを再現する極限でも維持されるかを調べることを目的の一

つとする。そのために、複数のパラメータ空間における相構造を解明する。

### (3)半古典近似による量子非摂動計算法

本研究ではsine-Gordon型ポテンシャルを持つ量子力学系に注目し、複数のインスタントンもしくは反インスタントンが共存する配位のエネルギー準位への寄与を計算する。特に、特にインスタントン-反インスタントンが同数共存する配位の振幅を計算することで、摂動的ボレル和に生じる虚部不定性が高次まで相殺されることを初めて具体的に示すことを目標にする。

## 3. 研究の方法

### (1)閉じ込め転移とカイラル転移の関係性

上述のZ3-QCDの有限温度計算を行う。大規模な格子計算により、Z3転移とカイラル転移の相転移温度の比較、相転移次数の解析を行う。先行研究と本研究の結果を精査することで、クォーク閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れとの相関を議論する。

### (2)閉じ込めのメカニズム

コンパクト化された時空間上のAdjoint QCDにおいてゲージ対称性と中心対称性に関する相構造(クォーク質量  $m$ 、コンパクト化スケール  $L$ 、twisted angle 空間上)を調べる。本研究では1ループ有効ポテンシャル、半古典近似、カイラル有効模型を用いて  $m$ - $L$  空間での相構造を解析し、3次元相図の全体像を理解する。

### (3)半古典近似による量子非摂動計算法

sine-Gordon量子力学系において、インスタントンと反インスタントンが共存するbion配位のエネルギー準位への寄与を計算する。また、CPN模型と呼ばれるQCDに似た性質を持つ2次元場の量子論においての、同様のbion配位の振幅を計算することで、摂動的ボレル和に生じる虚部不定性が相殺されるか否かをチェックする

## 4. 研究成果

### (1)閉じ込め転移とカイラル転移の関係性

Z3-QCDに関する有限温度格子シミュレーションを行い、ポリャコフループと呼ばれる閉じ込めの秩序変数とカイラル対称性の秩序変数であるカイラル凝縮の温度依存性を調べた。その結果、非常に明瞭な閉じ込め/非閉じ込めの1次相転移を発見する[図2]とともに、その相転移がカイラル転移に大きく影響する様子を確認した[図3]。このほかにも、有限密度

系に初めてこのモデルを応用し、NJL模型と呼ばれる理論の範囲内で解析を行った。

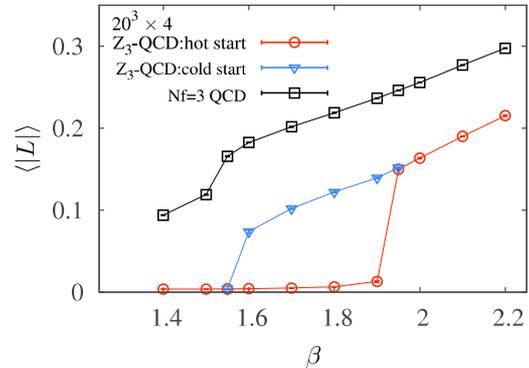


図2: Z3-QCDにおける閉じ込め転移

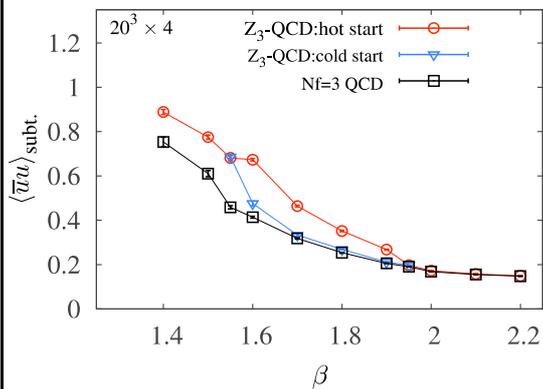


図3: Z3-QCDにおけるカイラル転移

### (2)閉じ込めのメカニズム

随伴表現クォークを導入したコンパクト時空間上のSU(N)ヤン-ミルズ理論(Adjoint QCD)において、ゲージ対称性と中心対称性に関する相構造(クォーク質量  $m$ 、コンパクト化スケール  $L$ 、twisted angle 空間上)を調べた[図4]。本研究では1ループ有効ポテンシャル、半古典近似、カイラル有効模型を用いて  $m$ - $L$  空間での相構造を解析し、3次元相図の全体像を初めて理解するとともに、カイラル対称性の破れが中心対称性の相構造に大きな影響を与えることを示した。また[Unsal, PRL100, 032005]において示された「Bion機構」と呼ばれる閉じ込め機構が一般境界条件でも生じることを示した。この研究は、境界条件をパラメータとして変化させることで、より広い視点から相構造や閉じ込め機構を解明しようという独創的な試みであるだけでなく、指数定理の拡張など場の理論に関する新しい理解を得ることに成功している。(素粒子メダル奨励賞受賞論文)

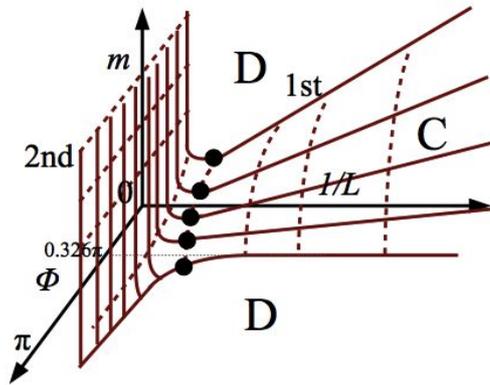


図4: Adjoint QCDにおけるパラメータ相構造

(3)半古典近似による量子非摂動計算法

sine-Gordon型ポテンシャルを持つ量子力学系に注目し、複数のインスタントンもしくは反インスタントンが共存する配位のエネルギー準位への寄与を計算した。我々は Bogomolny-Zinn-Justin 処方と呼ばれる計算処方を拡張することで、一般の数のインスタントンが含まれる場合にも amplitude が計算出来ることを示した。その結果、複数インスタントン計算から生じる imaginary ambiguity が摂動計算のボレル和から生じる imaginary ambiguity を相殺するという事実を、高次まで示すことに成功した[図5]。また、uniform-WKB と呼ばれる非摂動計算手法とも完璧な一致を示すことを発見した。これらの結果はインスタントン-反インスタントンの配位の周りでの摂動級数を足し合わせ「て (trans-series) 非摂動的に量子論を定義する resurgence theory の有効性を少なくとも量子力学の範囲内で裏付けている。我々は2次元 CPN 模型においても同様の複数インスタントン計算を実行し、摂動計算と比較出来る imaginary ambiguity の結果を得た。

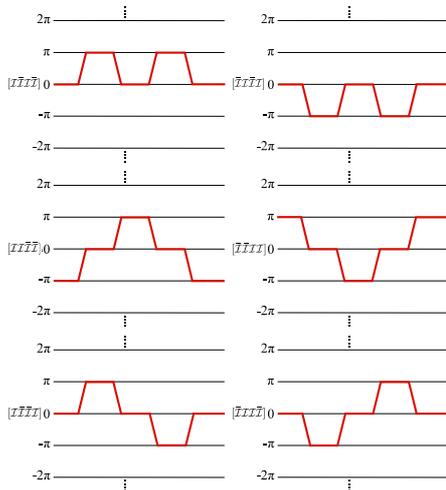


図5: Sine-Gordon量子力学における複数インスタントン配位

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 8 件) 全て査読有

1. Takumi Iritani, Etsuko Ito, Tatsuhiro Misumi, “Lattice study on QCD-like theory with exact center symmetry” *Journal of High Energy Physics*, 11(2015) 159 (2015) 10.1007/JHEP11(2015)159.
2. Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Resurgence in sine-Gordon quantum mechanics: Exact agreement between multi-instantons and uniform WKB” *Journal of High Energy Physics*, 09(2015) 157 (2015) 10.1007/JHEP09(2015)157.
3. Hiroaki Kouno, Kouji Kashiwa, Junichi Takahashi, Tatsuhiro Misumi, Masanobu Yahiro, “Understanding QCD at high density from a Z3-symmetric QCD-like theory” *Physical Physical Review D* **93**, 056009 (2016) 10.1103/PhysRevD.93.056009.
4. So Matsuura, Tatsuhiro Misumi, Kazutoshi Ohta, “Exact results in discretized gauge theories”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 03(2015) 033B07 10.1093/ptep/ptv021.
5. Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Classifying bions in Grassmann sigma models and non-Abelian gauge theories by D-branes”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 03(2015) 033B02 10.1093/ptep/ptv009.
6. So Matsuura, Tatsuhiro Misumi, Kazutoshi Ohta, “Topologically twisted N=(2,2) supersymmetric Yang-Mills theory on arbitrary discretized Riemann surface”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 12(2014) 123B01 10.1093/ptep/ptu153.
7. Tatsuhiro Misumi, Takuya Kanazawa, “Adjoint QCD on R^3 times S^1 with twisted fermionic boundary conditions”, *Journal of High Energy Physics*, 06(2014) 181 (2014) 10.1007/JHEP06(2014)181.
8. Tatsuhiro Misumi, Muneto Nitta, Norisuke Sakai, “Neutral bions in the CP^N-1 model”, *Journal of High Energy Physics*, 06(2014) 164 (2014) 10.1007/JHEP06(2014)164..

〔学会発表〕(計 11 件)

1. Tatsuhiro Misumi, “Resurgence and Topological Objects in Quantum Theories”, (招待講演) Keio University Topological Science Kick-off Symposium, Keio University, Yokohama, 3/15/2016
2. 三角樹弘, “Sine-Gordon 型量子力学における Resurgence 展開”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 26aSC-12, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 26 日
3. 三角樹弘, “Z3 中心対称性を保つ QCD 型理論における有限温度相転移”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 27pSM-8, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 27 日
4. 三角樹弘, “複合ソリトン配位に基づく量子非摂動現象と Resurgence 展開” (招待講演) 瀬戸内 Summer Institute, せとうちそう, 香川県坂出市, 2015 年 9 月 7-8 日
5. Tatsuhiro Misumi, Takumi Iritani, Etsuko Itou, “Finite-temperature phase transition for Nf=3 QCD with exact center symmetry”, 33<sup>th</sup> International Symposium on Lattice Field Theory, Kobe Convention Center, Kobe, 7/14/2015.
6. 三角樹弘, “Adjoint QCD on compactified spacetime with twisted boundary conditions” 「トポロジカルソリトン 2015」, 慶應義塾大学, 横浜市, 2015 年 2 月 4 日
7. Tatushiro Misumi, “Bions, Confinement and Resurgence”, (招待講演) KEK Theory Workshop 2015, KEK, Tsukuba, 1/28/2015.
8. 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑, “CP<sup>N</sup>-1 模型における Neutral bions 配位”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 21aSF-4, 佐賀, 2014 年 9 月 21 日
9. 三角樹弘, “Adjoint QCD on compactified spacetime with twisted boundary conditions” (招待講演), 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」, 慶應義塾大学, 横浜市, 2014 年 9 月 14 日
10. Tatsuhiro Misumi, “Old guy and Youngsters and BNL”, (招待講演) HET-RBRC Symposium CreutzFest2014, Brookhaven National Laboratory, Upton, US, 9/5/2014.
11. Tatsuhiro Misumi, So Matsuura, Kazutoshi Ohta, “Exact results in supersymmetric lattice gauge theories”, Yukawa Institute,

Kyoto University, Kyoto,  
7/22/2014.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三角 樹弘 (MISUMI, Tatsuhiro)

秋田大学・工学資源学研究所・専任講師

研究者番号: 80715152