

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03627

研究課題名（和文）リサージェンスを通じた場の量子論における摂動・非摂動関係の解明

研究課題名（英文）Resurgence and perturbative/non-perturbative relation in quantum field theories

研究代表者

藤森 俊明 (Fujimori, Toshiaki)

慶應義塾大学・商学部（日吉）・助教

研究者番号：60773398

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では場の量子論における摂動的解析と非摂動物理の関係を明らかにするために、リサージェンス理論の研究を進めた。漸近的自由性を持つような強結合理論における、いわゆるリノーマロン問題の解決を目指し、2次元の非線形シグマ模型に焦点を当て、そのリサージェンス構造を調べた。特に経路積分における複素鞍点解に注目し、それが非摂動的物理に与える影響について明らかにした。さらにそれらの研究の応用例として、相転移の物理やシュウィンガー機構による粒子生成に関する物理などの多岐にわたる問題に対してリサージェンス理論が適用可能であることを示した。これらの研究をもとにして更なるリサージェンス理論の発展が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論物理学における難問の多くは従来から用いられている解析方法である摂動論を用いた手法では解くことができない。そのため更なる物理学の進展のためには従来の解析方法を越える新たな研究手法が必要となる。本研究課題で扱ったリサージェンス理論はそのような新たな解析手法の一つと期待されている。現在、リサージェンス理論において完全には解明されていない問題が残されており、それを解決することが重要課題となっている。本研究課題における成果は、そのような未解決の問題の解決に向けて重要な意義を持つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, resurgence theory is studied to clarify the relationship between perturbative analysis and non-perturbative physics. We focused on two-dimensional nonlinear sigma models and studied their resurgence structure to solve the so-called renormalon problem in strongly coupled systems such as asymptotically free theories. In particular, we focused on the complex saddle point solution in the path integral and clarified its effect on non-perturbative physics. Furthermore, as an example of the application of these studies, we showed that resurgence theory can be applied to a wide range of problems, such as the physics of phase transitions and particle production by the Schwinger mechanism.

研究分野：素粒子物理

キーワード：場の量子論 リサージェンス理論 非摂動効果 摂動論 経路積分

1. 研究開始当初の背景

リサージェンス理論と呼ばれる解析手法が、場の量子論における非摂動的問題を解くために有用であり、その完全な理解が強結合の物理を解明するために重要となると考えられていた。その一方で、リサージェンス理論を場の量子論へと適用する際の障害として、いわゆる「リノーマロン問題」と呼ばれる難問が古くから存在しており、それに対する解決法の発見が待ち望まれていた。そのような中で、経路積分における「複素鞍点」や「レフシェッツシンプル法」などの解析手法の進展をもとにして新たなリノーマロン問題へのアプローチが可能となるであろうと期待されていた。

2. 研究の目的

非摂動効果によってもたらされる物理現象を理解することは現代物理学の重要な研究課題である。通常、非摂動効果の解析には困難が伴う。その理由は、非摂動効果が大きな影響力を持つ強結合の物理系においては、摂動的手法が適用できないという所にある。したがって、非摂動的物理の調べるためには、摂動論を越える新たな研究手法が必要となる。リサージェンス理論はそのような新たな研究手法の一つである。摂動展開によって得られる摂動級数は、結合定数などのような展開パラメータが小さい場合は良い近似を与えるが、大きな結合定数の場合、つまり強結合の系においてはその精度に限界が存在する。それは摂動級数が収束半径ゼロの漸近級数であることに起因するが、そのような級数を意味付けするために「ボレル和」という総和法が用いられる。しかし多くの場合、その「ボレル和」には不定性が現れてしまい一見するとうまく定義されていないように思える。実はそのような不定性の存在が却って摂動級数と非摂動効果をつなぐ鍵となる。一般的に、無矛盾な物理量は不定性を持たないことから、摂動・非摂動的不定性がそれぞれ存在し、それらは全体として打ち消し合うことが帰結される。このような不定性の相殺に起因する摂動・非摂動間の非自明な関係が「リサージェンス構造」である。それを理解することは量子論の非摂動的な構造の解明に繋がるため重要な研究対象として注目されている。本研究課題の目的は上記のリサージェンス理論の理解をより進展させ、摂動・非摂動物理の間の関係を明らかにすることである。特に経路積分における鞍点解がリサージェンス理論において果たす役割を明らかにすることが重要課題である。

3. 研究の方法

・レフシェッツシンプル法による非摂動効果の解析

通常積分において複素鞍点の寄与は積分路の変更によって取り入れられる。しかし無限自由度である経路積分の場合、積分路の変更の仕方は非自明である。その指針を与える手法が「レフシェッツシンプル法」である。過去の研究において、我々はそれを sine-Gordon 型や CP^{N-1} 型の量子力学系に適用することによって、複素鞍点解に伴う非摂動効果を初めて導出している。一方で他自由度系や場の量子論への拡張は、定性的な議論がされているのみであった。そのような状況を踏まえて、より広い物理系に対してレフシェッツシンプル法を適用して非摂動効果を解明した。

・複素パイオン解を通した二次元非線形 模型における非摂動構造

二次元非線形 模型は非常に豊かな非摂動的構造を有しており、非摂動物理を調べるための「実験場」として非常に有用である。そこでは特に「分数量子化されたインスタントン解」や、それを構成要素とする「複素パイオン解」が非摂動効果を担うと期待されている。複素パイオン解は次元縮約によって量子力学系における鞍点と同一視されるため、過去の量子力学系における複素パイオン解やリサージェンス構造の研究結果を二次元非線形 模型へ応用が可能であった。そのような点に注目して、複素パイオン解を導出し、その性質を調べることによって二次元非線形 模型におけるリサージェンス構造を調べた。

4. 研究成果

(1) 超対称を持つチャーン・サイモンズ-物質場結合系のリサージェンス構造

チャーン・サイモンズ-物質場系のリサージェンス構造を解析した。場の量子論への応用の第一歩として、まず厳密に解析できる系のリサージェンス構造調べることが重要であった。本研究では、超対称チャーンサイモンズ-物質場結合系では、「局所化」による厳密な結果が

知られていることに注目して、非自明なリサージェンス構造を明らかにした。

参考文献

Fujimori Toshiaki, Honda Masazumi, Kamata Syo, Misumi Tatsuhiro, Sakai Norisuke
“Resurgence and Lefschetz thimble in three-dimensional $\mathcal{N}=2$ supersymmetric Chern-Simons matter theories”
2018年 Progress of Theoretical and Experimental Physics DOI 10.1093/ptep/pty118

(2) 二次元 CP^N 非線形シグマ模型におけるバイオン解

非線形シグマ模型におけるバイオン解とそれがもたらす非摂動的寄与を研究した。本研究では、二次元 CP^N 非線形シグマ模型においていわゆる「バイオン解」を導出し、その非摂動的寄与とリノーマロンの寄与を比較した。二次元の非線形シグマ模型は、QCDのような四次元のゲージ理論と多くの類似点を持つため、二次元 CP^N 非線形シグマ模型のリサージェンス構造の解明は、リサージェンス理論のQCDへの応用、特にリノーマロン問題の解決の糸口となると期待される。

参考文献

Fujimori Toshiaki, Kamata Syo, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke
“Bion non-perturbative contributions versus infrared renormalons in two-dimensional CP^{N-1} models”
2019年 Journal of High Energy Physics DOI 10.1007/JHEP02(2019)190

(3) CP^{N-1} シグマ模型の格子シミュレーション

リサージェンス理論は、摂動・非摂動的解析を関連付けるものである。その理解を深めるためには何らかの非摂動的な手法が必要となる。そこで格子シミュレーションによって CP^{N-1} シグマ模型を調べた。本研究では、まず有限温度における解析を行い、閉じ込め・非閉じ込めのクロスオーバーなどの非摂動的な現象を調べた。また「 Z_N 対称なツイスト境界条件」を課した場合のシミュレーションも行い、「 Z_N 対称性」が常に保たれるという結果を得た。

参考文献

Fujimori Toshiaki, Ito Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke
“Confinement-deconfinement crossover in the lattice CP^{N-1} model”
2019年 Physical Review D DOI 10.1103/PhysRevD.100.094506
Fujimori Toshiaki, Ito Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke
“Lattice CP^{N-1} model with Z_N twisted boundary condition: bions, adiabatic continuity and pseudo-entropy”
2020年 Journal of High Energy Physics DOI 10.1007/JHEP08(2020)011

(4) カイラル磁性体への応用

この研究ではカイラル磁性体における非摂動効果をもたらすと考えられるインスタントンを調べた。Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用に対応する項を持つ $O(3)$ シグマ模型を用いて、ヘリカルな空間変調状態におけるインスタントンを分類した。この研究によってカイラル磁性体そのものだけでなく、 CP^1 シグマ模型の新たな非摂動的側面を明らかになった。また別の論文ではカイラル磁性体中のマグノンの有効理論に関する研究を行った。その物理系を記述する模型として非相対論的項やジャロシンスキー-守谷相互作用を表す項を伴った $O(3)$ シグマ模型を調べ、その非一様相におけるスペクトルや分散関係を調べた。またシュウイングー機構のアナロジーとして、非一様磁場によって非摂動的な粒子生成が起こることを示した。これらの研究は様々な物理系における非摂動的な手法の応用の足がかりになると考えられる。

参考文献

Hongo Masaru, Fujimori Toshiaki, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke
“Instantons in chiral magnets”
2020年 Physical Review B DOI 10.1103/PhysRevB.101.104417

(5) 完全 WKB 解析を用いたシュウイングー機構の研究

完全 WKB 解析を用いて、時間依存する強電場のもとでの荷電粒子の対生成を議論した。その結果、準古典的な状況のもとでの対生成数が「Stokes segment に対する接続行列」の積を用いて与えられることを示した。この研究によって完全 WKB 解析のシュウイングー機構への応用が、広く一般的な時間依存する電場のもとで可能となった。

参考文献

Taya Hidetoshi, Fujimori Toshiaki, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke
“Exact WKB analysis of the vacuum pair production by time-dependent electric fields”

- (6) 本研究ではリサージェンス理論を用いて量子相転移を調べる手法を議論した。そのために厳密に解析可能で量子相転移が存在することが知られている 3 次元 $N=4$ 超対称 QED において、分配関数の $1/N$ 展開の摂動級数の振る舞いから読み取ることができる「ボレル平面上の特異点の構造」と量子相転移の関係を調べた。その結果として、系のパラメータを変化に伴って複数のボレル平面上の特異点が移動し、それらが衝突する際に相転移が起こること、さらに衝突の前後における移動角度によって相転移の次数がわかることが判明した。これは一般的に、系の自由度 N に関して展開をすることによってその漸近級数から相転移を調べることができることを意味しており、リサージェンス理論の応用という側面において大きな進展とすることができる。

参考文献

Toshiaki Fujimori, Masazumi Honda, Syo Kamata, Tatsuhiko Misumi, Norisuke Sakai
“Quantum phase transition and resurgence: Lessons from three-dimensional $N=4$ supersymmetric quantum electrodynamics”
2021 年 PTEP DOI 10.1093/ptep/ptab086

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Fujimori Toshiaki, Honda Masazumi, Kamata Syo, Misumi Tatsuhiro, Sakai Norisuke, Yoda Takuya	4. 巻 2021
2. 論文標題 Quantum phase transition and resurgence: Lessons from three-dimensional $\mathcal{N}=4$ supersymmetric quantum electrodynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fujimori Toshiaki, Itou Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 JHEP08(2020)011
2. 論文標題 Lattice CP^N-1 model with Z_N twisted boundary condition: bions, adiabatic continuity and pseudo-entropy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP08(2020)011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Taya Hidetoshi, Fujimori Toshiaki, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 JHEP03(2021)082
2. 論文標題 Exact WKB analysis of the vacuum pair production by time-dependent electric fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2021)082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fujimori Toshiaki, Itou Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 100
2. 論文標題 Confinement-deconfinement crossover in the lattice CP^{N-1} model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.094506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hongo Masaru, Fujimori Toshiaki, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 101
2. 論文標題 Instantons in chiral magnets	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 1 - 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.104417	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimori Toshiaki, Kamata Syo, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke	4. 巻 2019
2. 論文標題 Bion non-perturbative contributions versus infrared renormalons in two-dimensional $\mathcal{N}=1$ models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 0 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2019)190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujimori Toshiaki, Honda Masazumi, Kamata Syo, Misumi Tatsuhiro, Sakai Norisuke	4. 巻 2018
2. 論文標題 Resurgence and Lefschetz thimble in three-dimensional $\mathcal{N}=2$ supersymmetric Chern-Simons matter theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤森 俊明、三角 樹弘、坂井 典佑	4. 巻 73
2. 論文標題 リサージェンス理論：摂動論から非摂動効果を理解する	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 352 ~ 360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.73.6_352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 藤森俊明, 鎌田翔, 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑
2. 発表標題 量子力学模型における経路積分と厳密なリサージェントランス級数
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshiaki Fujimori
2. 発表標題 Exact resurgent transseries from path integral in a quantum mechanical model Toshiaki Fujimori
3. 学会等名 Strings & Fields 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiaki Fujimori
2. 発表標題 Bions in large-N sigma models
3. 学会等名 YITP-RIKEN iTHEMS Molecule-type Workshop 2020 Potential Toolkit to Attack Nonperturbative Aspects of QFT -Resurgence and related topics- (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fujimori Toshiaki, Itou Etsuko, Misumi Tatsuhiro, Nitta Muneto, Sakai Norisuke
2. 発表標題 Lattice study on the twisted CP^{N-1} models on $R \times S^1$
3. 学会等名 Lattice 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiaki Fujimori
2. 発表標題 Bion Saddle Points and Resurgence in CP ^N Model
3. 学会等名 Resurgence in Mathematics and Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤森俊明, 伊藤悦子, 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑
2. 発表標題 コンパクト化したCPN模型のラージN極限および格子シミュレーションによる解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋圭介, 藤森俊明, 新田宗土
2. 発表標題 Hanay-Tong moduli spaces for BPS Lumps on generalized flag manifolds
3. 学会等名 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本郷優, 藤森俊明, 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑
2. 発表標題 Dzyaloshinsky-Moriya相互作用を含む1次元反強磁性スピン鎖のインスタントン解と非一様相
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本郷優, 藤森俊明, 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑
2. 発表標題 Dzylaoshinsky-Moriya相互作用を含む1+1次元非線形シグマ模型のBPSインスタントン解と非一様相
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋圭介, 藤森俊明, 新田宗土
2. 発表標題 Linear Models for Generalized Flag Manifolds from Various Quiver Diagrams
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤森俊明, 鎌田翔, 三角樹弘, 新田宗土, 坂井典佑
2. 発表標題 CPNシグマ模型のラージN極限とリサージェンス
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三角樹弘, 藤森俊明, 本多正純, 鎌田翔, 坂井典佑
2. 発表標題 N=2 Chern-Simons matter theoryにおけるリサージェンス構造とシンプル構造
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤森俊明, 新田宗土, 大橋圭介, 横倉諒
2. 発表標題 Ghost-free p-form higher derivative gauge theories in 4D N=1 SUSY
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤森俊明
2. 発表標題 Bions and Resurgent Perturbative/Non-perturbative Relation
3. 学会等名 2018年度 第1回日露ワーキングセミナー（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤森俊明
2. 発表標題 Bion and resurgence in 2d CPN sigma model
3. 学会等名 Strings and Fields 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------