

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32629

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14296

研究課題名（和文）超対称性の低エネルギー拡大現象とそれを用いた超共形場理論の解明

研究課題名（英文）Research on superconformal field theories via low energy supersymmetry enhancement

研究代表者

丸吉 一暢 (Maruyoshi, Kazunobu)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：30781942

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）：本研究では、場の量子論において特異な現象と思われていた、超対称性の低エネルギーでの拡大現象について、拡大条件・拡大理由を明らかにし、超弦理論の視点からも幾何学的に拡大理由を考察することで、現象の全容を解明した。これにより発展した低エネルギー有効理論の探索方法を活用することで、一般の4次元超対称理論の低エネルギー固定点に対する研究を推進し、ラグランジアンの有無に関わらない、低エネルギー固定点の分類方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

場の量子論において、対称性は低エネルギーになるほど縮小することが一般的である。しかし、本研究は、これとは逆の対称性の拡大が比較的多くの場合に起こりうることを示した。また、この現象の機構を理解したことで、これまで解析が困難であった4次元超共形場理論の分配関数の計算などに応用され、国内外の後続の研究にも多数引用されている。さらに、 $N=1$ 超共形場理論の分類は前人未至の問題であるが、本研究で培った低エネルギー固定点の探索方法は、この問題に対して有効であることを示しており、今後のこの方向の研究に指針を与えるものとなった。

研究成果の概要（英文）：We studied the low energy enhancement of the supersymmetry in four-dimensional quantum field theory. We clarified the conditions and the reasons of the enhancement, and found the geometric understanding of the enhancement in superstring theory. Furthermore, by applying the deformation procedure of four-dimensional supersymmetric theories developed in the study of the low energy enhancement, we developed a method to find the low energy fixed points of general four-dimensional field theories.

研究分野：場の量子論

キーワード：超対称性 場の量子論 共形場理論

1. 研究開始当初の背景

超対称性は大雑把にはボーズ粒子とフェルミ粒子の間の対称性で、標準模型の「不自然さ」の問題や「力の統一」の問題を解決することなどから、超対称性を持つ理論に対する研究が今なお精力的に行われている。このような理論の量子論的な性質を解明することは素粒子論の重要な問題のひとつである。特に、共形対称性と呼ばれる高い対称性を同時に持つ超共形場理論が本研究の対象である。超共形場理論は、対称性の高さ故に3点相関関数などのごく少数の情報のみから他の物理量を求めることができ、他に比べて扱いやすい構造を持っている。(4次元では超対称性の大きさに応じて、 $N=1,2,3,4$ で分類される超共形対称性が存在する。)

このような理論を調べる手段として、局所化と呼ばれる計算手法が注目を浴びている。この手法を用いることにより、超対称性の無い理論では極めて困難であった分配関数や相関関数などの厳密な計算が可能になる。しかし、局所化が適応可能なのはラグランジアンで記述できる理論のみである。本研究の対象である共形対称性を持つ理論ではラグランジアンでの記述が知られているものはごく一部で、多くはラグランジアンでの記述が知られていない強結合な理論である。これらに対して局所化の手法はその効力を発揮しない。

このような状況下で、丸吉は、低エネルギー理論が強結合な $N=2$ 超共形場理論になるような、ラグランジアンで記述される $N=1$ 超対称ゲージ理論を発見した[1]。これは、ラグランジアンでの記述を使って局所化により $N=2$ 超共形場理論の分配関数を計算することができるという点で大きな可能性を秘めていた。実際 [1] では、共形指数と呼ばれる分配関数の一種を初めて完全に計算することに成功し、この結果の有効性を証明した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超対称性の低エネルギーでの拡大現象及びそれを誘発するラグランジアン理論を発展・応用することにより、これまで解析が困難であった $N=1,2$ 超共形場理論の性質の解明を行うことである。

3. 研究の方法

A) 超対称性の低エネルギーでの拡大現象の解明

拡大条件: [1]では、図1のように $N=2$ 理論に $N=1$ 超対称性を保つ特別な変形を加えることで、 $N=1$ 超対称ゲージ理論が得られた。よって、この理論および低エネルギー理論は、変形前の $N=2$ 理論と変形の仕方の2点によって分類される。これに関

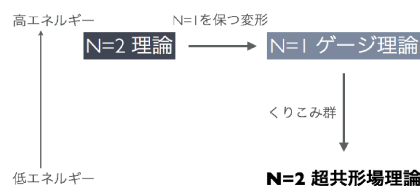


図 1

して、[2]によって見つかった任意の $N=2$ 理論に関連する2次元カイラル代数に注目し、関連性を調べた。

拡大理由: 超対称性が低エネルギーで拡大し、 $N=2$ 超対称性を持つためには、 $N=2$ クーロン相が存在しないとイケない。このクーロン相の真空構造は Seiberg-Witten 理論によって既に知られている。そこで、上記の $N=2$ 理論の変形によって、低エネルギーで Seiberg-Witten 理論が得られるかどうかを調べた。

B) 超対称理論の性質は超弦理論や M 理論での幾何的な情報と密接に関連していることが多い。

よって、超対称性の拡大現象を M 理論から幾何的に考察することで、現象の異なる視点からの理解を進めた。

C) N=1 超共形場理論の分類

一般の N=1 超共形場理論の可能な全ての变形を理解し、低エネルギー固定点を調べた。特に、A)で培った变形の計算手法を応用して、数式処理ソフトを用いて可能な全ての变形を発見した。これは N=1 超共形場理論の分類という前人未至の問題に繋がるものである。

4. 研究成果

平成 29 年度は、方法 A) 超対称性が低エネルギーで拡大する 4 次元ラグランジアン理論の探索とその拡大条件、拡大理由の解明に焦点を当て研究を進めた。条件については、变形前の N=2 理論に関連する 2 次元カイラル代数の Sugawara 条件が低エネルギーでの超対称性の拡大と関係していることを、様々な場合で確かめた。理由の解明については、特に低エネルギーでの真空構造をラグランジアン理論の観点から調べることにより、真空がクーロン相であること、それを記述する Seiberg-Witten 曲線等を導出することに成功した。これらの研究は超対称性の拡大現象の解明に欠かせないものであり、今後の研究においても有用となるものである。

また、低エネルギーで E7 型の対称性を持つ N=2 超共形場理論を固定点として持つような上記とは異なるモデルを発見し、その超共形指数の計算に成功した。

平成 30 年度は、方法 B) M 理論、特に、M5 プレーン上の 6 次元共形場理論のコンパクト化として 4 次元 N=2 理論を捉え、そのコンパクト化に用いる 2 次元多様体と超対称性の低エネルギー拡大現象の有無に相関があることを発見した。これは、超対称性拡大の幾何学的な理解を進める上で重要である上、Seiberg-Witten 曲線を M5 プレーンの幾何学から導出することを可能にした。

方法 C) 4 次元 N=1 ラグランジアン理論の低エネルギー固定点を分類する研究を推進した。特に、低エネルギー固定点を持つ最も単純なラグランジアン理論である、N=1 超対称 SU(2) ゲージ理論において、その变形によって得られるすべての低エネルギー固定点を調べ、その特徴を明らかにした。また、その中に超対称性が拡大し、超共形場理論になるような固定点が含まれることを示した。

令和元年度、令和2年度、令和3年度は、方法 C) 4 次元 N=1 ラグランジアン理論の低エネルギー固定点を分類する研究を継続・推進した。前年度に行った SU(2) ゲージ理論の研究を基にして、その他のゲージ群の場合や多様な物質場が存在する場合に範囲を広げ低エネルギー固定点を調べた。さらに、分類方法をラグランジアンの存在に依存しない手法に改良した。このような方法を用いてラグランジアンが知られていないいくつかの理論に関しても固定点の分類を行った。

また、ディフェクトを含んだ 4 次元ラグランジアン理論、特にラインディフェクトが挿入された 4 次元 N=2 超対称ゲージ理論の分配関数について研究を行い、楕円型の可積分系 (の L 演算子) との対応関係を発見するなどの成果が得られた。

参考文献

- [1] K. Maruyoshi, J. Song, arXiv:1606.05632 [hep-th]
- [2] C. Beem et al., Commun.Math.Phys.336 (2015) no.3, 1359-1433

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Maruyoshi Kazunobu, Ota Toshihiro, Yagi Junya	4. 巻 2021
2. 論文標題 Wilson- 't Hooft lines as transfer matrices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2021)072	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 該当する

1. 著者名 Maruyoshi Kazunobu, Nardoni Emily, Song Jaewon	4. 巻 122
2. 論文標題 Landscape of Simple Superconformal Field Theories in 4D	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1 - 6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.121601	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 該当する

1. 著者名 Agarwal Prarit, Maruyoshi Kazunobu, Song Jaewon	4. 巻 2018
2. 論文標題 A “Lagrangian” for the E7 superconformal theory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1 - 23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2018)193	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 7件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 丸吉一暢	
2. 発表標題 Wilson- 't Hooft line defects as transfer matrices	
3. 学会等名 Space-time topology behind formation of micro-macro magneto-vortical structure manifested by Nambu mechanics（招待講演）（国際学会）	
4. 発表年 2020年	

1. 発表者名 Kazunobu Maruyoshi
2. 発表標題 Deformations of 4d SCFTs and infrared supersymmetry enhancement
3. 学会等名 New Frontiers in String Theory 2018, YITP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazunobu Maruyoshi
2. 発表標題 RG flows with enhanced infrared supersymmetry
3. 学会等名 Strings, Branes and Gauge Theories, APCTP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazunobu Maruyoshi
2. 発表標題 Supersymmetry enhancing RG flow in 4d QFT
3. 学会等名 Superconformal Field Theories and Geometry, Aspen (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazunobu Maruyoshi
2. 発表標題 Supersymmetry enhancing RG flow and AD theories
3. 学会等名 Geometric Correspondences of Gauge Theories, Vienna (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazunobu Maruyoshi
2. 発表標題 RG flows and deformations of simple SCFTs
3. 学会等名 Post-Strings Conference "New Frontiers in String Theory 2018" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazunobu Maruyoshi
2. 発表標題 Lagrangians for Argyres-Douglas theories
3. 学会等名 Workshop on "Topological Field Theories, String Theory and Matrix Models" 2017, Lebedev Physical Institute (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017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			
米国	UCLA			
カナダ	Perimeter Institute			
中国	Tsinghua University			
韓国	KAIST	Korea Institute for Advanced Study		