

令和元年6月11日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13798

研究課題名（和文）格子数値計算による超対称性の自発的破れの解明

研究課題名（英文）Supersymmetry and the spontaneous breaking in lattice simulations

研究代表者

浮田 尚哉（UKITA, NAOYA）

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：50422192

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超対称性の自発的破れの有無を判定できる体系的、かつ非摂動的解析手法の開発と整備を行なった。グラディエントフロー方程式を用いてエネルギー・運動量テンソルの正則化に依らない定式化を与えた。一旦、格子上のエネルギー・運動量テンソルが構成できれば、原理的に真空エネルギーの測定を数値計算で実行でき、超対称性の自発的破れの有無を判定出来る。また模型固有の性質によらない極めて汎用性が高い手法である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の進展により、計算格子超対称性ととも呼ぶべき分野が開拓され、大統一理論、暗黒物質の起源をはじめ、超弦理論を背景とする宇宙創成の問題やAdS/CFT対応など、超対称性や超対称性の破れと関連した多様な物理にこれまでにない角度から切り込み考察できるようになった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a systematic and non-perturbative analysis method that can detect spontaneous supersymmetry breaking. Using a gradient flow equation, we give a formulation of the energy and momentum tensor that does not depend on any regularization. Once the energy and momentum tensor on the lattice can be constructed, in principle the measurement of vacuum energy can be performed by numerical calculation, and the spontaneous breaking of supersymmetry can be determined. It is also a highly versatile method that does not depend on the model's inherent properties.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：超対称性 グラディエントフロー方程式 格子ゲージ理論 非摂動効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超対称性は、素粒子標準模型の未解決問題である階層性問題や世代構造の起源、更に暗黒物質の正体等を解決するアイデアとして理論と実験の両面から、これまで精力的に調査研究されてきた。超対称性はフェルミ粒子とボーズ粒子の質量の縮退を预言する。しかし、自然界ではその縮退が実現していない。それゆえ、南部博士がかつてカイラル対称性の自発的な破れから物質の質量の起源を説明したように、超対称性も何らかの機構で自発的に破れていることが期待される。しかし超対称性の非繰り込み定理(Grisaru 1979)により、量子効果で生ずる破れの現象の解析には摂動論を超えた手法が必須となる。幾つかのモデルで解析的な研究(Witten 1982, Affleck-Dine-Seiberg 1984)があってもなお、その機構の理解はまだ不十分で、モデルによらない非摂動的解析手法を用いた研究が望まれていた。

ところで、超対称性の破れの有無は真空のエネルギーから決まる。その真空エネルギー測定に、場の理論の非摂動的定式化である格子場の理論を使うことは最有力である。これまで、量子色力学(QCD)への適用では、現実のハドロンスpekトルの再現や宇宙初期に起きた相転移現象の定量的解析で結果を出している。同様に、エネルギー測定に必要なエネルギー・運動量テンソルの格子上の定義が与えられたなら、超対称性の破れの有無を数値計算で明らかにできる。しかし、格子が無限小並進対称性を壊すことで、その定義自体がそもそも難しく解決の糸口がなかった。最近、グラディエントフロー方程式(Luscher 2010)を介した超対称性を持たないゲージ理論(ヤン・ミルズ理論、QCD)のエネルギー・運動量テンソルの格子上での定義が提案された(鈴木 2013, Del Debbio et al. 2013)。超対称理論に対しても、グラディエントフロー方程式(菊地-大野木 2014)が提案されたが、その方程式がドウィット・フリードマン流の超対称性(de Wit-Freedman 1975)を持っているのか、またエネルギー・運動量テンソルの構成に使えるか等、まだ実用には不十分な点がある。ましてや数値計算へのチャレンジなど全くできていない状況であった。

2. 研究の目的

超対称理論が現実世界を記述するためには、超対称性は低エネルギー領域で自発的に破れていなければならない。実際、いくつかの模型で、非摂動効果によるその破れの有無が調べられている。ただし、その解析手法は、それら模型特有の性質を多用しているために、すべての超対称模型に適用できるわけではない。

本研究の目的は、超対称性の自発的破れの有無を判定できる体系的、かつ非摂動的解析手法の開発と整備である。

格子ゲージ理論で提案されたグラディエントフロー方程式によるエネルギー・運動量テンソルの格子上での定式化を拡張して、その構成法を超対称模型の場合に確立し、数値計算に必要な数学的基礎を固める。この格子理論による手法は、一旦、格子上のエネルギー・運動量テンソルが構成できれば、原理的に真空エネルギーの測定を数値計算で実行でき、模型固有の性質によらず極めて汎用性が高い。これにより、超対称性の自発的破れの機構を体系的に調査解明でき、大統一理論や暗黒物質の起源等の超対称性の諸問題に新しい観点から攻め入ることを可能にする。

3. 研究の方法

格子理論で超対称性の自発的破れを評価するために、グラディエントフロー方程式を用いた格子上でのエネルギー・運動量テンソルの構成法を超対称理論に適用する。

まずは、本研究の土台を成す4次元 $N=1$ 超対称ヤン・ミルズ理論のグラディエントフロー方程式の再導出から始める。具体的に以下(1)、(2)、(3)を実行する。

(1) グラディエントフロー方程式を導出する際に、エネルギー・運動量テンソルの構成を容易にできる様に、特に理論の対称性を尊重した条件を課し、得られた方程式が有する対称性を限なく調べ上げる。

この対称性に関する情報は、このフロー系の本質的な性質で、有限フロー時刻での物理量に制限を与える等重要な役割を持つ。

(2) 格子上のエネルギー・運動量テンソルの構成に必要な条件は、有限フロー時刻での物理量が紫外有限性を持つことである。この条件を満たしていることを見るために、1ループの摂動計算で紫外有限性を確認し、その後、摂動の全次数で紫外有限性が保証されていることを証明する。

上記(1)と(2)により、先行研究(菊地-大野木 2014)での未解決課題を肯定的に解決できる。

(3) 本研究の主目的である格子上のエネルギー・運動量テンソルの定式化を、グラディエントフロー方程式を用いて与え、数値計算に必要な数学的基礎を固める。

4. 研究成果

(1) グラディエントフロー方程式の超対称変換性の発見：

本研究課題の基礎方程式となる4次元 $N=1$ 超対称ヤン・ミルズ理論のグラディエントフロー方程式は、菊地-大野木 (2014) によりヴェス・ズミノゲージ固定した超場の方程式として導出された。この方程式はゲージ対称性を持つが、超対称変換（ドウィット・フリードマン流の超対称変換）で閉じず、超対称性がどのように実現できるかは未解決であった。

本研究の成果は、超対称変換のもとで、その方程式がゲージ変換のズレを除いて不変であることを示した。更に任意のゲージ固定項を付け加えてもその性質を保つこと導き、上記未解決問題の一つの答えを与えた。従って、ゲージ不変な物理量にとっては、このグラディエントフロー方程式は超対称なのである。この結果により、ゲージ不変な超多重項（エネルギー・運動量テンソルを含むフェラーラ・ズミノ多重項に代表される物理量）の超対称変換性は、その方程式に付随する任意のフロー時刻で普遍であることが明らかになった。

この成果について、日本物理学会で講演を行い、また論文にまとめて査読有雑誌に投稿中である。

(2) 有限フロー時刻の物理量が紫外有限性を有することの証明：

グラディエントフロー方程式単独の性質として、超対称性を持つことがわかった。次は、格子上でエネルギー・運動量テンソルの定式化を可能にするための条件「量子効果を考慮したときに、有限フロー時刻で物理量が紫外有限になる。」を満たすかを調べた。先ず、摂動の1ループ計算でフロー場の2点相関関数が紫外有限であることを示した。この肯定的な結果を受けて、任意の摂動展開を定義する $4+1$ 次元理論を構築し、この系が持つ対称性の要請から無矛盾な結果として、摂動の全次数で物理量が紫外有限性を有することを証明した。この成果により、本研究課題の目的である格子上のエネルギー・運動量テンソルの構成とそれを使った超対称性の自発的破れの体系的、かつ非摂動的解析手法の開発と整備への道を切り開いた。

この成果について、日本物理学会で講演を行ない、現在論文にまとめている。

(3) エネルギー・運動量テンソルの正則化によらない定式化：

4次元 $N=1$ 超対称ヤン・ミルズ理論のフロー系は、フロー時間によらない普遍的な超対称性を持ち、有限フロー時刻の物理量の紫外有限性を保証することが本研究で示された。この性質を最大限に利用して、正則化によらないフェラーラ・ズミノ超多重項の構成を試みた。先ず、その超多重項の最低次成分である R カレントの正則化に依存しないフロー場での表式を、1ループ摂動論と小フロー時間展開の技法 (Luscher-Weisz 2011, 鈴木 2013) により導いた。次に、得られた R カレントに超対称変換を作用させて、超カレント、更にはエネルギー・運動量テンソルの正則化によらない定式化を与えた。

この成果について、日本物理学会で講演を行ない、現在論文にまとめている。

今後の展望としては、物質場を導入した $N=1$ 超対称 QCD への拡張や、より大きな対称性を持った $N=2, 4$ 超対称ヤン・ミルズ理論でのフロー系の整備が考えられる。これが完成すると、従来の手計算では解析しきれない非摂動効果や超対称性の自発的破れの数値計算による体系的な解明が加速的に進展し、素粒子標準模型を超えた物理への道筋を与えることになり、得られた知見から素粒子標準模型を超えた物理の決定につながる。

(4) ヴェス・ズミノ模型への拡張：

ここまでで分かっていることは、ゲージ理論のゲージ対称性は有限フロー時刻の物理量の紫外有限性を保証し (Luscher-Weisz 2011)、4次元 $N=1$ 超対称ヤン・ミルズ理論のゲージ対称性と超対称性も同じく紫外有限性を導くことである。素朴な疑問は、ゲージ対称性を持たず超対称性だけを持つヴェス・ズミノ模型は紫外有限性を有しているのかである。これに解答するすために、ヴェス・ズミノ模型に対する超対称性を持ったグラディエントフロー方程式を導出し、摂動計算で必要になる形式的な一般解を構成した。

この成果について、論文にまとめて査読有雑誌に投稿中で、日本物理学会での講演を行なった。また、超対称性だけを持つこの理論の摂動計算は現在進行中である。この考察を通じて、フロー系が秘める紫外有限性の理解の深化につながることを期待される。

(5) 格子計算の解析手法の開発：

最近、格子 QCD 分野で巨大な物理体積を使った数値計算が提案された (Luscher 2018)。マスターフィールド形式と名付けられ、純粋に有限体積効果を取り除いた QCD 数値計算の実現や、巨大な格子体積を必要とする多核子系の物理や QED への適用が考えられる。また、体積を大きくすればするほど高精度で物理量を評価出来るので、素粒子標準模型の精密な検証や素粒子標準模型を超えた物理の探索に大きく貢献出来ること期待される。今後、格子計算で超対称性の自発的破れを定量的に解析するときには、マスターフィールド形式が理想的であり、それに向けた有用な数値計算の解析手法を開発することは重要である。これは当初予期していなかった課題

であるが、格子 QCD へのインパクトも大きいことが予想できたために、従来にない技法を一つ提案した。具体的には、格子の幾何を利用して、時間と空間運動量の解像度を向上させる処方である。実際に数値実験を行い有用性を示した。
この成果をまとめた論文は、査読有論文に掲載された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① N. Ukita, K. I. Ishikawa and Y. Kuramashi,
Utility of geometry in lattice QCD simulations,
Phys. Rev. D98, no. 1, 014515 (2018), pp. 1-10, 査読有,
doi:10.1103/PhysRevD.98.014515.

[学会発表] (計 8 件)

- ① 浮田 尚哉、加堂 大輔、
超対称グラディエントフローが持つ紫外有限性に基づいた物理量の構成、
日本物理学会 第74回年次大会、2019年.
- ② 加堂 大輔、浮田 尚哉、
SQCDにおける超対称グラディエントフロー方程式、
日本物理学会 第74回年次大会、2019年.
- ③ 加堂 大輔、菊地 健吾、浮田 尚哉、
Wess-Zuminoグラディエントフローとその摂動論、
日本物理学会 第74回年次大会、2019年.
- ④ 浮田 尚哉、加堂 大輔、
超対称グラディエントフロー方程式を用いた 4D N=1 SYM の超カレントの構成、
日本物理学会 2018秋季大会、2018年.
- ⑤ 加堂 大輔、浮田 尚哉、
SUSY gradient flow equation in N=1 SYM、
日本物理学会 2018秋季大会、2018年.
- ⑥ 加堂 大輔、菊地 健吾、浮田 尚哉、
Wess-Zumino模型に対するグラディエントフロー方程式、
日本物理学会 2018秋季大会、2018年.
- ⑦ 浮田 尚哉、加堂 大輔、
N=1 超対称グラディエントフロー方程式での紫外有限性の証明、
日本物理学会 第73回年次大会、2018年.
- ⑧ 加堂 大輔、浮田 尚哉、
超対称ヤンミルズ理論のグラディエントフロー方程式に関する幾つかの考察、
日本物理学会 2017秋季大会、2017年.

[その他]

査読有雑誌に投稿中の論文：

- ① D. Kadoh, K. Kikuchi and N. Ukita, Supersymmetric gradient flow in Wess-Zumino model,
e-Print:arXiv:1904.06582[hep-th].
- ② D. Kadoh, and N. Ukita, Supersymmetric gradient flow in N=1 SYM,
e-Print:arXiv:1812.02351[hep-th].

アウトリーチ活動：

- ① 第 10 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム
でのポスター発表、筑波大学、2018年10月15-16日.
- ② 2017年度筑波大学計算科学研究センター一般公開「スーパーコンピュータを見に行こう！」
での研究紹介、2017年4月22日.

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名：加堂 大輔

ローマ字氏名：(KADOH, daisuke)

所属研究機関名：慶應義塾大学

部局名：自然科学研究教育センター（日吉）

職名：訪問研究員

研究者番号（8桁）：90447219

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。