

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14265

研究課題名(和文)ラグランジアンのない場の量子論の基礎及び応用

研究課題名(英文)Basics and applications of quantum field theory without Lagrangians

研究代表者

米倉 和也 (Yonekura, Kazuya)

東北大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90769043

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：場の量子論は現代物理学の基礎をなす重要な枠組みであるが、その定式化は未だに完全な理解とは程遠い。古くから知られているラグランジアンに基づく解析では見えないような現象が多々あり、そのような現象を多数明らかにできた。特に「可逆な場の理論」と呼ばれるものは物質の相構造の理解やストリング理論への制限など幅広い文脈で現れる。その分類をラグランジアンに頼らずに場の理論の原理に基づいて行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

場の量子論をラグランジアンに頼らずに解析することは、まず場の量子論という現代物理学の極めて重要な枠組みをよりよく理解することに重要である。これは基礎物理学の原理とは何かという根本的な問題と本質的に結びついている。さらに物質などの性質でラグランジアンからは容易に読み取ることができないものも、ラグランジアンに頼らない抽象的な議論によって明らかになってくる。私の研究によって、このような理解を押し進めることができた。

研究成果の概要(英文)：Quantum field theory is an important framework of modern physics. However, its completely satisfactory formulation is not yet achieved. There are many phenomena which cannot be seen from the old analyses based on Lagrangians. I have succeeded in revealing many such phenomena. In particular, theories called "invertible field theories" are important for the understanding of phases of matter and consistency conditions of string theory. I have shown classification of them without using Lagrangians.

研究分野：場の量子論

キーワード：トポロジー 量子アノマリー

1. 研究開始当初の背景

現代物理学における場の量子論の重要性は疑いようがない。それにもかかわらず場の量子論の真の定式化にはまだ程遠い状況である。古くから行われてきた正準量子化などの手続きでは構成できないような理論や、または構成は可能でもその本質が見えない理論がある。つまり場の量子論の基本原理はまだわかっていない。

2. 研究の目的

古くから行われてきた方法では構成できない、あるいはその本質が掴めないような理論を記述する原理を探究するとともに、その応用も探る。

3. 研究の方法

一つには、超弦理論などを使った研究の方法がある。超弦理論はラグランジアンのないような理論が実現される非常に豊富な体系であり、それゆえ超弦理論は場の量子論の性質を探索する非常に良い実験場になる。もう一つは場の量子論における局所性やユニタリ性と言った基本的な原理に基づいて、そこから何が帰結できるかを調べることである。

4. 研究成果

場の量子論をラグランジアンに頼らずに調べる時は、局所性やユニタリ性などの基本原則が非常に重要になる。それらの原理の数学的公理化に基づいて、可逆場の理論の分類定理を証明した。可逆場の理論は場の量子論の量子異常、物質のトポロジカル相、一般化された項など重要な役割を果たす。これらをラグランジアンに一切頼らずに分類することに成功した。

M理論のM5-braneの上に現れる6次元 $N=(2,0)$ 超対称共形場理論は、ラグランジアンのない場の量子論の中で最も代表的かつ重要な理論である。この理論が存在することによって、極めてよく知られている理論についての新しい性質を導くことができる。M5-braneが一枚ある場合を2次元トーラスにコンパクト化すると、4次元で(超対称化された)通常の自由マクスウェル理論になる。この自由マクスウェル理論は全くよく知られた理論でラグランジアンももちろん存在するが、実はこの理論はnon-Lagrangian的な性質を含んでいることはあまり認識されていない。自由マクスウェル理論には電場と磁場を入れ替える電磁双対性という性質があり、それはマクスウェル方程式の時点では簡単にみることができる。しかし電磁双対の量子力学的な側面を見ようとする途端に話が難しくなってくる。電磁双対が最も一般に作用する場合はラグランジアンによる定式化は困難になってくる。しかし、6次元 $N=(2,0)$ 超対称共形場理論のトーラスコンパクト化を使うことによってその性質を調べることができる。私の研究(Seiberg氏、立川氏との共同研究)で、この電磁双対が実は非自明な重力場中で量子アノマリーを持つことを明らかにした。これはつまり、古典マクスウェル方程式の時点では完全な対称性に見えていた電磁双対が実は量子効果によって非常に微妙に破れているということである。これは興味深い現象であり、ストリング理論でも重要な役割を果たすと考えており、さらなる研究に発展すると期待している。

一見ラグランジアンがあるような理論でも、その理論の性質が常にラグランジアンからわかるとは全く保証されていない。マクスウェル理論を量子力学的に取り扱ったときの電磁双対性などがその例である。この電磁双対性はストリング理論などで重要な役割を果たすので、その性質を十分理解することは重要である。前年度に引き続きこの量子マクスウェル理論の電磁双対性のアノマリーを調べ、そのアノマリーを完全に決定することに成功した。また、そのアノマリーの存在のおかげでストリング理論がオリエンティフォルドの存在時に無矛盾でいられることも示した。他の例として、カイラルフェルミオンがある。カイラルフェルミオンはラグランジアンがあると多くの人は思っているが、それはあくまで摂動的な場合であり、非摂動的に通用する定式化は実は近年まで知られていなかった。これは格子ゲージ理論と関係なく連続的な場の理論でさえ知られていなかったということである。この状況はWittenの5年ほど

前の研究で改善して、非摂動的な定式化が可能になったが、しかしそこでは抽象的な数学が使われており、物理的意味は必ずしも明解に説明されていなかった。今年度の研究で、そこからさらに理解を深め、カイラルフェルミオンとそのアノマリーについての物理的に極めて満足いく定式化をすることができた。

ラグランジアンによる理論の記述だけでなく、そこにさらにダイナミカルな物体を加えて考えることが重要なケースというのが多々ある。有名な例は、ストリング理論の低エネルギーによる記述を考えたときにその超重力理論による記述だけではなくさらにブレーンと呼ばれる物体を考えることによって種々の興味深い状況が実現できる。これらのケースによって引き起こされる現象はラグランジアンを解析するだけでは出てこなくて、もっと工夫した解析が必要である。ストリング理論の場合のブレーンのようなものを一般に考えたとき、2つのブレーンの中で電荷がテレポートするという現象を発見した。これはブレーン同士の幾何学的な位置関係を変えていくことによって引き起こされる。個々のブレーン上には電荷の保存を破るような自由度が住んでいるが、ブレーンとバルクの無質量粒子が結合することによって起こるアノマリー流入の現象によって系全体としての無矛盾性、特に電荷の保存が保たれる。個々のブレーン上では電荷保存が破れるので、あたかも電荷がテレポートしたかのような現象が起こる。このような現象はストリング理論だけではなくもっと広い理論で起こると思っている。たとえば素粒子論で仮想的に考えることができる磁気単極子とアキシオン、ストリングというものを考えるとその間で電荷のテレポートが起こる。それだけではなくさらに物質中でこのような現象が起きればとても面白いと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Hajime Fukuda, Kazuya Yonekura	4. 巻 1
2. 論文標題 Witten effect, anomaly inflow, and charge teleportation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2021)119	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 Kazuya Yonekura	4. 巻 3
2. 論文標題 General anomaly matching by Goldstone bosons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)057	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 Kazuya Yonekura	4. 巻 5
2. 論文標題 Anomaly matching in QCD thermal phase transition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2019)062	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 Yuji Tachikawa, Kazuya Yonekura	4. 巻 7
2. 論文標題 Why are fractional charges of orientifolds compatible with Dirac quantization?	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SciPost Phys.	6. 最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhys.7.5.058	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 Kazuya Yonekura	4. 巻 368
2. 論文標題 On the cobordism classification of symmetry protected topological phases	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Commun.Math.Phys.	6. 最初と最後の頁 1121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00220-019-03439-y	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 Chang-Tse Hsieh, Yuji Tachikawa, Kazuya Yonekura	4. 巻 123
2. 論文標題 Anomaly of the Electromagnetic Duality of Maxwell Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys.Rev.Lett.	6. 最初と最後の頁 161601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.161601	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 Masahito Yamazaki, Kazuya Yonekura	4. 巻 2
2. 論文標題 Confinement as analytic continuation beyond infinite coupling	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 13383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013383	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 Dongmin Gang, Kazuya Yonekura	4. 巻 -
2. 論文標題 Symmetry enhancement and closing of knots in 3d/3d correspondence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2018)145	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 Nathan Seiberg, Yuji Tachikawa, Kazuya Yonekura	4. 巻 -
2. 論文標題 Anomalies of duality groups and extended conformal manifolds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty069	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 Inaki Etxebarria, Hirotaka Hayashi, Kantaro Ohmori, Yuji Tachikawa, Kazuya Yonekura	4. 巻 JHEP11(2017)177
2. 論文標題 8d gauge anomalies and the topological Green-Schwarz mechanism	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2017)177	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 Dongmin Gang, Yuji Tachikawa, Kazuya Yonekura	4. 巻 96
2. 論文標題 Smallest 3d hyperbolic manifolds via simple 3d theories	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PHYSICAL REVIEW D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.061701	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 Masahito Yamazaki, Kazuya Yonekura	4. 巻 JHEP07(2017)088
2. 論文標題 From 4d Yang-Mills to 2d CP ^{N-1} model: IR problem and confinement at weak coupling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2017)088	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------