

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03633

研究課題名(和文) 時空の対称性と素粒子

研究課題名(英文) Space-time symmetry and particle physics

研究代表者

藤川 和男 (FUJIKAWA, Kazuo)

国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・客員研究員

研究者番号：30013436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：まず量子異常とBerry位相の違いを明確にしたことは、今後の多くの分野でのこれらの概念の応用とか発展に本質的な寄与をされると考えられる。断熱近似と正確な記述の差は重要であり、まず量子論を構築しそこで断熱近似を適用すればBerry位相と関係した現象が理解され、理論の構成から正確と思われる対称性が必然的に敗れた形でしか成立しないのが量子異常である。

最近考察したMajorana 粒子の素粒子の標準理論等の場の理論的に正確な記述は、ほとんど全ての教科書とか論文でこれまで見過ごされてきた点であり、将来の教科書の記述等で本質的な修正が行われる事項である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基礎物理学の考察が社会的な意義を持つかどうかは難しい問題であるが、われわれの行った量子異常とBerry位相の考察は素粒子論のみならず原子核物理学とか物性物理学等における量子論および場の理論の応用において重要になると予想される。

またMajoranaフェルミオンの考察は、通常のカイラルフェルミオンの考察と直行した角度からのスピノールの考察であり、将来のより明確な理解に導くものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The difference of quantum anomalies and the approximate Berry's phase has not been formulated in the past. The application of the adiabatic approximation to the exact quantum mechanical formulation leads to the adiabatic Berry's phase. If the exact symmetry of the starting formulation can be realized in quantum theory only in a deformed form, it is generally defined as the quantum anomaly. A clear recognition of these differences would contribute to the precise description of the various applications of those field theoretical ideas in various fields of physics.

The recent analysis of the Majorana neutrinos in the seesaw mechanism in the Standard Model will force physicists to rewrite the descriptions in most textbooks and papers in neutrino physics. It is interesting that a Bogoliubov-like transformation is required to make a transition from the Weyl-type description to the Majorana description of neutrinos in quantum field theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：quantum anomalies Berry's phase Majorana neutrinos

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Majorana ニュートリノに関してはいわゆる pseudo-C 対称性を用いるのが一般的であった。これが問題を含んでいることは以前にも示したところである。量子情報理論における Grover のアルゴリズムと呼ばれるものの基本的なメカニズムすなわちエンタングルメントに基づいているのかコヒーレンスに基づくのか自明ではなかった。断熱近似の結果として得られる Berry 位相と正確な対称性が量子効果で破れる量子異常の区別が明確でなかった。

2. 研究の目的

時空および素粒子が持つ基本的な対称性を研究する。まずこれまでの研究の手始めとして、荷電共役、パリティおよび CPT 対称性のより深い理解とその素粒子および宇宙論的な現象への応用を考える。とくに、ニュートリノの質量の問題と関係したマヨラナ粒子の持つ諸特性を研究する。つぎにフェルミ粒子が持つカイラル対称性とその量子的な破れ (アノマリー) の研究を続ける。アノマリーとベリーの位相と呼ばれるものの違いを明確にする。量子力学そのもののより深い理解と関係しては、量子計算の基礎的な部分とかエンタングルメントと不確定性関係の関連を研究する。

3. 研究の方法

大目標としては、時空および素粒子が持つ基本的な対称性を研究する。細目としても、荷電共役、パリティおよび CPT 対称性のより深い理解とその素粒子および宇宙論的な現象への応用を考える。とくに、ニュートリノの質量の問題と関係したマヨラナ粒子の持つ諸特性を研究する。つぎにフェルミ粒子が持つカイラル対称性とその量子的な破れ (アノマリー) の研究を続ける。アノマリーとベリーの位相と呼ばれるものの違いを明確にする。量子力学そのもののより深い理解と関係しては、量子計算の基礎的な部分とかエンタングルメントと不確定性関係の関連を研究したい。より長期的には、量子情報の扱いを経路積分に一般化するというのが大きな目標である。量子情報の議論では演算子形式のみが使われているというのが実情であるが、もし経路積分で使いやすい定式化ができれば、いろいろな応用が考えられる。素粒子物理の一般的な性質として、場の量子論で全てが記述されるが、この場の量子論の基本的な性質をより深く理解し、場の理論をより対称性の理解に使いやすい形に定式化したい。

4. 研究成果

ベリー位相およびマヨラナフェルミ粒子の基本的な性質を解明した。まずベリー位相というもののより基本的な理解を深めた。正確に解けるモデルに基づきベリー位相のトポロジカルな性質

を詳細に調べ、ベリー位相に特徴的なレベルの交差と断熱過程の仮定に含まれる物理的な帰結を明らかにした。ベリー位相は、レベル交差の点から離れたパラメータ空間では仮想的な磁気単極子のような振る舞いをするが、交差点の近傍に近づくと単極子の半分の磁荷を持つ半単極子になり、さらに交差点に近づくと双極子に変形することを示した。このスムーズなトポロジーの変形は、過去におけるある種の応用における結論の変更をせまるものである。ベリー位相に関係した磁気単極子はパラメータ空間で定義されているが、この磁気単極子の実空間での対応物がどのようなものかは興味があるが、これは今まで知られていない新しいディラックの磁気単極子であることを示した。ベリー位相という量子力学の断熱過程に伴うパラメータ空間に伴うトポロジカルな現象がこれまでには知られていなかった全く新しいディラック磁気単極子の存在に導くのは興味がある。

フェルミ粒子にはディラック型とマヨラナ型の2種類のフェルミオンが知られている。このうちマヨラナ粒子の定義に関して、長い間ニュートリノの研究者の間で誤解があり、数学的に矛盾した定義が使われていた。これまでのマヨラナ粒子の定義に使われた荷電共役の演算子はクリフォード代数の表現論で定義されるものではなく疑荷電演算子とも呼ばれるものであることを示した。また素粒子の標準模型のような理論ではマヨラナ的なニュートリノはカイラルなフェルミ粒子から構成されるが、この場合はマヨラナ粒子は荷電共役ではなくCP対称性で定義するのが、自然であり数学的にも矛盾しないものであることを示した。この問題は、マヨラナ粒子をCP変換で定義して、また粒子の位相を少し調整するとうまく行くことを示した。同様な問題は中性子と反中性子の間の振動の可能性を議論するときにも起こるが、それも同様に解決される。

海外共同研究のテーマである中性子-反中性子振動は、かなり古いテーマであるが、この問題の理論的な側面として、パリティ演算子の問題がある。よく知られているように、マヨラナ粒子のパリティは、ディラックの行列で i ガンマーゼロを用いるのが最も自然である。しかし、我々が見だしたのは、通常のガンマーゼロ行列を用いる変換が、中性子-反中性子振動が起こるか否かの判定条件を与えるという事実である。これは非常に簡単であるが有用な判定条件である。

核子-反核子振動に関係した基礎的な側面の研究を行った。特に時間反転との兼ね合いの研究を行った。次に、量子異常とBerry位相の関係に関しては、通常理解であるBerry位相が量子異常に関係しているというのは多くの人たちの論文で議論されてきた研究であるが、(ローレンツ不変な理論で正確に定義される対称性が量子効果で破れる場合がある)という量子異常の定義から見れば、全面的に誤りであることを数個の論文およびレビュー論文で明確にした。論拠は、Berry位相は量子力学の断熱近似に基づいているという事実である。これはBerryの最初の論文がまさしくこのような近似に基づいているという事実のみならず、Born-Oppenheimer近似でも同様な位相を導けるという事実でわかる。この問題は、多くの人たちが誤解に基づいて多くの論文を書いたのは、非常に残念な事実であり、量子異常の正確な理解を妨げまたBerry位相の正しい理解をも損なった。

現在は、ニュートリノの Majorana 粒子としての理解に関して、ほとんどすべての教科書および論文で、いわゆる偽荷電共役の定義（Weinberg の論文で最初に使われた）に基づいていると考えられるが、この対称性を用いると最初に定義した Majorana 粒子の作用（ラグランジアン）がゼロになるという明確な矛盾に目を閉じているという重大な欠点を持っている。この欠点を明確に示す論文を現在準備中であり近く公表する予定である。ニュートリノの振動に関しては、基礎的な考察を行い、論文を書いた。これは、振動という現象は非常に深い量子論の本質と結びついているが、本質は非常に明快な 2 つの基礎的な現象につながっており、時間の併進に関して不変であるというエネルギー保存則の基本にニュートリノの振動が反しているように見える現象も理解される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Kazuo Fujikawa and Koichiro Umetsu	4. 巻 105
2. 論文標題 Path integral derivation of the equations of the anomalous Hall effect	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 155118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.155118	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 Kazuo Fujikawa and Koichiro Umetsu	4. 巻 128
2. 論文標題 Berry's Phase and Quantum Anomalies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in particle and nuclear physics	6. 最初と最後の頁 103992
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnnp.2022.103992	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 Kazuo Fujikawa and Koichiro Umetsu	4. 巻 103
2. 論文標題 Lensing of Dirac monopole in Berry's phase	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 96004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.103.096004	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 Kazuo Fujikawa and Anca Tureanu	4. 巻 13
2. 論文標題 Neutron Oscillations and the Parity Doubling Theorem	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Symmetry	6. 最初と最後の頁 2202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/sym13112202	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 Shinichi Deguchi and Kazuo Fujikawa	4. 巻 416
2. 論文標題 No anomalous canonical commutators induced by Berry ' s phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 168160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2020.168160	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 Kazuo Fujikawa	4. 巻 80
2. 論文標題 Operatorial characterization of Majorana neutrinos	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 285
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7855-4	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 Kazuo Fujikawa	4. 巻 102
2. 論文標題 Parity and CP operations for Majorana neutrinos	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 105001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.105001	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 Kazuo Fujikawa and Anca Tureanu	4. 巻 103
2. 論文標題 Parity of the neutron consistent with neutron-antineutron oscillations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 65017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.065017	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 Shinichi Deguchi and Kazuo Fujikawa	4. 巻 100
2. 論文標題 Topology change from a monopole to a dipole in Berry's phase	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 025002-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.025002	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 Kazuo Fujikawa and Anca Toreanu	4. 巻 79
2. 論文標題 Seesaw mechanism and pseudo C-symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Eur. Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 752-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-019-7245-y	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 Shinichi Deguchi and Kazuo Fujikawa	4. 巻 802
2. 論文標題 A new magnetic monopole inspired by Berry's phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135210-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135210	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 Kazuo Fujikawa	4. 巻 80
2. 論文標題 Operatorial characterization of Majorana neutrinos	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Eur. Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 285-
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-020-7855-4	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 Kazuo Fujikawa	4. 巻 789
2. 論文標題 Generalized Pauli-Gursey transformation and Majorana neutrinos	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 76-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.12.008	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 Kazuo Fujikawa, C.H. Oh, and Koichiro Umetsu	4. 巻 34
2. 論文標題 A classical limit of Grover 's algorithm induced by dephasing: Coherence versus entanglement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1950146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732319501463	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

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Kazuo Fujikawa
2. 発表標題 Symmetry principle and symmetry breaking in particle physics
3. 学会等名 11th INDIA-JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY SEMINAR (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤川和男
2. 発表標題 益川さんの思い出-マヨラナフェルミオンのCP-
3. 学会等名 益川先生追悼シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuo Fujikawa
2. 発表標題 Chiral anomaly and Berry's phase
3. 学会等名 Workshop on "Open Problems and Opportunities in Chiral Fluids" sponsored by Los Alamos National Lab at Santa Fe, New Mexico, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

藤川和男のホームページ http://aries.phys.cst.nihon-u.ac.jp/~fujii-3/
--

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
---------	---------