

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540401

研究課題名（和文） 量子論の基礎的な側面の考察

研究課題名（英文） Study of the basic aspects of quantum theory

研究代表者

藤川 和男 (FUJIKAWA KAZUO)

独立行政法人理化学研究所・橋本数理物理学研究室・客員研究員

研究者番号：30013436

研究成果の概要（和文）：

2次発散を示す場の理論において高次微分正則化が次元正則化と同じ結果を与えることを示した。周期的な境界条件を課した場合の不確定性関係を明確にし、確率との関連の研究を進めた。さらに、quantum discord に関して、Bell の Hilbert 空間の次元が  $d=2$  の隠れた変数も排除されることを示した。最近の不確定性関係の話題と関連して、常に成立する Heisenberg 型の不確定性関係を提唱した。また、粒子と反粒子の質量が異なるような CPT 対称性を破る Lagrangian を与えた。

研究成果の概要（英文）：

The higher-derivative regularization is shown to give the same result as the dimensional regularization for quadratic divergences. The probability interpretation of uncertainty relation is pursued after refining the treatment of periodic boundary conditions. The hidden-variables model of Bell was excluded in analyzing quantum discord. In connection with recent experiment, a universally valid Heisenberg uncertainty relation was proposed. A Lorentz invariant CPT violating model which exhibits the particle-antiparticle mass splitting was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	0	0	0
2009年度	0	0	0
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

キーワード：不確定性関係、不偏測定、エンタングルメント、量子異常(アノマリー)、幾何学的位相、CPT 対称性、二次発散

### 1. 研究開始当初の背景

量子力学の基礎的な側面の理解に関しては、量子情報等との関連で世界的に多くの研究がおこなわれて、その理解が急速に深まってきた。しかし、量子情報の専門家といった比較的狭い分野の人たちを越えて、より広い立場の物理学者が理解できるような定式化とか方法論はまだ確立していない。より広い物理学の立場から、量子力学の基礎とか量子情報の基礎を理解することは望ましいと考えられた。また、場の理論においても、2次発散と「自然さ」を深く考察し、超対称性の必然性を理解することは重要な問題であった。

### 2. 研究の目的

量子力学および場の量子論の基礎的な側面、特に様々な位相、不確定性関係、エンタングルメント等の現象のより深い理解を目指すことを目標とした。幾何学的な位相に関しては、その起源を第2量子化に伴う隠れたゲージ対称性とする解釈を広めることが一つの目的であった。不確定性関係に関しては、その本質をより深く理解して、その応用も考えることであった。さらにエンタングルメントとかより一般の量子力学の特性の理解を深め、量子情報等の広い立場からの理解を深めることであった。さらに場の理論における2次発散の扱い等の基礎的な側面の理解を超対称性とかからめて深めることも目標とした。

### 3. 研究の方法

国内外の多くの研究者と交流し、より柔軟な問題意識を養い、問題の本質にせまることが重要であると考えた。国際会議に参加したり、外国の専門家を訪ね議論をして研究を進めた。とくに、量子情報に関してはシンガポール大学、場の理論の基礎に関してはヘルシンキ大学の人たちと交流を深めた。また中国の研究者とは基礎物理学一般に関して交流し新しい問題意識を醸成した。国際会議等で、幾何学的な位相が生じる基本的な機構に関して研究代表者の考えを理解してもらうよう努めた。

### 4. 研究成果

(1) まず不確定性関係に関しては、量子力学の確率解釈と絡めて、その破れが確率的に小さければ許されるとする立場から論文を発表した。また、素朴な Heisenberg 型の不確定性関係が実験的に破れる可能性に関しては、小澤博士の提案を少し変更し普遍的に

成立する Heisenberg 型の不確定性関係を提案し、その特性を詳細に研究した。

(2) エンタングルメント以外の量子論の特性として注目を集めた Quantum Discord の研究に関連して、Bell の隠れた変数のモデルを吟味し、条件付きの測定という概念に適用すると隠れた変数のモデルが破たんすることを示した。これは量子論における演算子の合成則が隠れた変数の理論では再現できないことに関係している。

(3) エンタングルメントの判定条件である CHSH 不等式および Bell の不等式に関しては、通常は局所的な隠れた変数の理論では記述できない非局所的な性質として理解されているが、これは正確ではなく、CHSH 不等式は隠れた変数のモデルとは無関係であることを示した、同時に Bell の用いた隠れた変数のモデルは Gleason の定理のいうように、次元が4のヒルベルト空間では定義できないことを明確に示した。

(4) 場の理論の基礎的な問題に関しては、まず Higgs 粒子の質量の2次発散の問題を考察し、2次発散は高階微分正則化でも次元正則化と同等な扱いができることを示した。これは2次発散に伴う「自然さ」の問題は本質的な問題でないことを示唆している。事実その後の LHC での実験でも超対称性の証拠が今のところ見つかっていないことと矛盾していない。また最近、CPT 対称性の破れの可能性とかその機構を考察し、非局所的な場の理論では、ローレンツ対称性および標準理論の  $SU(2) \times U(1)$  ゲージ対称性を損なわずに CPT の破れおよびニュートリノと反ニュートリノに異なる質量を与えうることを示した。これは将来の宇宙のバリオン数の考察に何かの意味を持つことが期待される。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① K. Fujikawa and K. Umetsu, "Aspects of universally valid Heisenberg uncertainty relation", PTEP 013A03 (2013). 査読有  
DOI: 10.1093/ptep/pts065
- ② M. Chaichian, K. Fujikawa and A. Tureanu, "Electromagnetic interaction in theory with Lorentz invariant CPT violation", Phys. Lett. B718 (2013) 1500-1504. 査読有  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.12.017
- ③ M. Chaichian, K. Fujikawa and A.

Tureanu, "On neutrino masses via CPT violating Higgs interaction in the Standard Model", Phys. Lett. B718 (2012) 178-180. 査読有

DOI: 10.1016/j.physletb.2012.09.071

- ④ K. Fujikawa, "Universally valid Heisenberg uncertainty relation", Phys. Rev. A 85, 062117 (2012). 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevA.85.062117

- ⑤ M. Chaichian, K. Fujikawa and A. Tureanu, "Lorentz invariant CPT violation", to appear in Eur. Phys. Jour. C. 査読有

- ⑥ K. Fujikawa, "Does CHSH inequality test the model of local hidden variables?", Prog. Theor. Phys. 127, 975-987 (2012). 査読有

DOI: 10.1143/PTP.127.975

- ⑦ K. Fujikawa, "Conditional measurement in noncontextual hidden-variable models", Prog. Theor. Phys. 127, 989-996 (2012). 査読有

DOI: 10.1143/PTP.127.989

- ⑧ M. Chaichian, K. Fujikawa and A. Tureanu, "Lorentz invariant CPT violation: Particle and antiparticle mass splitting", Phys. Lett. B712 (2012) 115-118. 査読有

DOI: 10.1016/j.physletb.2012.04.048

- ⑨ K. Fujikawa, "Quantum discord and noncontextual hidden-variable models", Phys. Rev. A85 (2012) 012114. 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevA.85.012114

- ⑩ K. Fujikawa, "Remark on the subtractive renormalization of quadratically divergent scalar mass", Phys. Rev. D83 (2011) 105012. 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.105012

- ⑪ K. Fujikawa and K. Umetsu, "Uncertainty relation and probability: Numerical illustration", Prog. of Theor. Phys. 125 (2011) 205-224. 査読有

DOI: 10.1143/PTP.125.205

- ⑫ K. Fujikawa, "Comment on the uncertainty relation with periodic boundary conditions", Prog. of Theor. Phys. 124 (2010) 747-759. 査読有

DOI: 10.1143/PTP.124.747

[学会発表] (計 3 件)

- ① K. Fujikawa, "Quantum Discord, CHSH Inequality and Hidden Variables ---Critical reassessment of hidden-variables models---, arXiv:1302.0916 [quant-ph]. Invited talk

given at Asia Pacific Conference and Workshop in Quantum Information Science 2012, 3-7 December 2012, Pullman Putrajaya Lakeside, Malaysia .

- ② K. Fujikawa, "Aharonov-Bohm effect and geometric phases ---Exact and approximate topology---, arXiv:1302.0456 [quant-ph]. Invited talk given at Tonomura FIRST International Symposium on Electron Microscopy and Gauge Fields, May 9-10, 2012, Tokyo, Japan.

- ③ K. Fujikawa, "Explicit formula of the separability criterion for continuous variables systems", Invited talk given at 5th Asia-Pacific Workshop on Quantum Information Science (5th APWQIS), May 25-28, 2011, Singapore. arXiv:1112.2252 [quant-ph]

[図書] (計 4 件)

- ① 藤川和男、"量子異常・ネーターの定理の量子的な破れ"、"数理物理 私の研究" 345 ページ (丸善出版、2012)。

- ② 藤川和男、"面白い発想とすごい発想"、"数理科学" 2012 年 6 月号 5 ページ (サイエンス社)。

- ③ 藤川和男、"物理学の対称性の様々な側面"、"数理科学" 2011 年 7 月号 8 ページ (サイエンス社)。

- ④ 藤川和男、"破れた対称性と物理世界"、"数理科学" 2010 年 12 月号 5 ページ (サイエンス社)。

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://aries.phys.cst.nihon-u.ac.jp/~fujiji-3/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤川 和男 (FUJIKAWA KAZUO)

独立行政法人理化学研究所・橋本数理物理学

研究室・客員研究員

研究者番号：30013436

### (2) 研究分担者

出口 真一 (DEGUCHI SHINICHI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：50207502

### (3) 連携研究者