

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400415

研究課題名(和文)量子力学および場の量子論の基礎的な側面の考察

研究課題名(英文)Study of fundamental issues in quantum mechanics and quantum field theory

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・仁科加速器研究センター・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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：情報理論の基本定理であるShannon-Nyquist-染谷のsampling定理が不確定性関係の表現であることを世界最初に示した。2つのスピンの相関測定で角度平均を用いると混合状態のentanglementが測定でき、Bellの不等式より正確になることを示した。また、相対論的な場の理論でのentanglementの議論の一般的な定式化とか、Hardyのパラドクスの単純化を与えた。

CPT対称性の破れが、相対論的に不変で非局所的な場の理論で可能なことを具体的なモデルで示し、ニュートリノ物理への応用等を議論した。その他、場の理論でのボソン化、gradient flowの一般の場への拡張等を議論した。

研究成果の概要(英文)：It has been shown, for the first time, that the basic sampling theorem by Shannon-Nyquist-Someya in classical information theory is a manifestation of the uncertainty relation. In connection with entanglement, we have shown that the two-spin correlation with the relative angle fixed but averaged over all the possible directions of spins gives useful information about the entanglement in general mixed states, which is more accurate than Bell's inequality. In addition, we formulated a general framework to analyze entanglement in relativistic quantum field theory, and also a much simplified formulation of the so-called Hardy's paradox.

In field theory, we have demonstrated explicitly a realization of CPT breaking in relativistically invariant theory but non-local in the Planck length, and discussed its possible implications. Other subjects in field theory such as the bosonization in d=2 theory, and the formulation of gradient flow for a general field theory have also been discussed.

研究分野：素粒子論

キーワード：エンタングルメント 不確定性関係 量子異常 CPT対称性 場の量子論

1. 研究開始当初の背景

不確定性関係に関しては名古屋の小澤博士等の問題提起により、より深い理解に向かう機運があった。不確定性関係が破れているというようなかなり誇大な報道は正しいとは言えないが、地道なより深い不確定性関係の理解が求められていた。量子情報に関しては易しい問題が終わり、より役に立つ研究が求められ始めていたが、この傾向はさらに強まってきている。Bell の不等式とか一般受けするテーマを超えたより学問的客観的な考察が求められていた。素粒子においては、Higgs 粒子が見つかり、それに続く超対称性の発見が期待されたがこれは残念ながら実現されなかった。非常に多くの優秀な若い人たちの巻き込んだ大きな流れが変わりつつあった。このように、流行に乗った研究というよりは地道な新しい方向性の模索の時期であった。

2. 研究の目的

上記のような状況に鑑み、自由な発想で、古い問題とか他の人が無視しがちな問題を含めて、基礎的な課題の研究を目指した。具体的には、エンタングルメントの主流である Bell の不等式とか Hardy のパラドクスの見直しとかより有効な方法を模索した。この分野は必ずしも自由な批判等を受け入れる土壌があるとは言えない側面もあるが、できるだけ批判的かつ建設的な研究を目指した。不確定性関係も過去の研究の再評価と新しい分野への応用を模索した。不確定性関係の定式化という観点から見ても非常に多様な考察が過去に行われていたが、これらをより統一的な観点から見直すことを目指した。時空の基礎的な対称性である CPT の研究も、このような研究自体を否定的に考える人たちもあり、また研究者の中でも相当意見が分かれている研究テーマがあるが、素直に問題を見直して、物理という観点から定式化することを目指した。すなわち、プランクの長さの物理とかに結びつけると同時に実際の実験とも関連づける方向を探った。

3. 研究の方法

研究の方法は一部の研究を除いて、海外の研究者との共同研究の形をとった。現地を訪問し、実際に議論をして理解を深めながら論文を書くというスタイルである。具体的には量子情報関係は Singapore の旧知の研究者との共同研究を続けた。Compressed sensing という分野では北京の研究者との共同研究を続けた。素粒子論に関係した研究では Helsinki 大学のこれまでも共同研究の実績のあるグループとの研究を継続した。研究テーマはこれまでの共同研究の実績に加えて、新しい問題でも双方に興味共有されているものを選択して研究を進めた。

4. 研究成果

(1). 名古屋大の小澤博士の問題提起により

世界的に、不確定性関係のより深いかつ正確な理解が試みられた。この一環として不確定性関係の定式化において、不偏測定と正確な測定が一般に両立しないという事実に基づき、過去に提案された多くの不確定性関係を統一的に扱った。この観点から小澤氏の主張およびそれに反対する主張を比較検討した。また古典的な情報理論の基本定理である Shannon-Nyquist- 染谷の sampling 定理が条件付き測定に伴う不確定性関係の表現であることを世界で最初に示した。逆説的ではあるが、不確定性関係を破る場合が sampling 定理を満たし、不確定性関係を満たす場合は情報量が十分でなく compressed sensing を用いた推察をする必要がある。古典測定における Shannon-Nyquist- 染谷の定理に加えて量子力学の測定も不確定性関係により制約を受けており、すべての測定の基礎が不確定性関係であることを明らかにした。この研究は中国の北京理工大学の研究者との共同研究である。

(2). 次に entanglement に関係したテーマに関係しては、相対論的な場の理論での entanglement の議論におけるスピン演算子のある種の選び方では、2 つの粒子の相対的なエネルギーの変化により entanglement の度合いが変化する可能性(これは粒子の寿命が速度によることのある意味での類似)を示した。またスピンと磁気モーメントの基本的な違いをカイラル変換の違いから明らかにした。この違いを無視した過去のスピンの測定の理論は整合性がないことが知られていたが、この問題の解決法を与えた。Entanglement の直感的な理解としての Hardy のパラドクスは広い意味での不確定性関係(測定と擾乱の関係)と関係しており、過去に考えられた Hardy のパラドクスをずっと簡単な実験に置き換えることができることを示した。また、2 個の qubit の相関で 2 つのスピンの相対的な角度を固定して、2 つのスピンを任意の角度で測定すると、任意の混合状態の場合の entanglement の測定ができ、その精度は Bell の不等式より正確になるという結果を示した。すなわち、Werner 状態と呼ばれる状態は Bell の不等式では判定できないがわれわれの与えた公式では判定できる。これは、シンガポール国立大の研究者との共同研究であるが、かなり以前に行われた酒井英行博士等の実験に刺激された考察である。

(3). 場の理論に関しては、量子異常の応用としての 2 次元の場の理論でのボソン化特に直接的なボソン化の経路積分による定式化の可能性を示した。また最近の格子ゲージ理論における gradient flow のこれまでの常識を覆して、より一般のゲージ自由度を持たない場の理論への拡張を示した。時空と場の理論の基本的な対称性である CPT 対称性の破れの可能性の研究においては、これまで広く信じられていた相対論を必然的に破るとい

う考えは正しくなく、相対論的に不変で非局所的な場の理論で可能なことを具体的な模型で示した。この研究のニュートリノ物理への可能な応用とか宇宙のバリオン数の生成に関して何がいえるか等の議論を与えた。この研究は Helsinki 大学の研究者との共同研究であり、さらに大きな発展が期待される。

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 13 件[全て査読あり])

1. K. Fujikawa, C.H. Oh, K. Umetsu, and Sixia Yu, "Separability criteria with angular and Hilbert-space averages", *Ann. of Physics* 368, (2016) 248 .
DOI: 10.1016/j.aop.2016.02.006
2. K. Fujikawa, "BCS, Nambu Jona-Lasinio, and Han-Nambu -- A sketch of Nambu's works in 1960-1965", arXiv:1602.08193. To appear in a special issue of *Prog. Theor. Exp. Phys.*
3. K. Fujikawa, "Yang-Mills theory and fermionic path integrals", *Mod. Phys. Lett. A* 31 (2016) 1630004.
DOI: 10.1142/S0217732316300044
4. K. Fujikawa, "The gradient flow in $\lambda\phi^4$ theory", *JHEP* 03 (2016) 021.
DOI: 10.1007/JHEP03(2016)021
5. K. Fujikawa and A. Tureanu, "Neutrino-antineutrino Mass Splitting in the Standard Model: Neutrino Oscillation and Baryogenesis", *Mod. Phys. Letters A* 30, 1530016 (2015).
DOI:10.1142/S0217732315300165
6. K. Fujikawa, Mo-Lin Ge, Yu-Long Liu and Qing Zhao, "Uncertainty principle, Shannon-Nyquist sampling and beyond", *Journal of Phys. Soc. Japan* 84, (2015) 064801.
DOI: 10.7566/JPSJ.84.064801
7. K. Fujikawa and H. Suzuki, "Bosonization in the path integral formulation", *Phys. Rev. D* 91, (2015) 065010.
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.065010
8. K. Fujikawa, C.H. Oh, and Sixia Yu, "Hardy's paradox and measurement-disturbance relations", *Phys. Rev. A* 91, (2015) 012105.
DOI:10.1103/PhysRevA.91.012105
9. K. Fujikawa and A. Tureanu, "Neutrino-antineutrino mass splitting in the Standard Model and baryogenesis", *Phys. Lett. B* 743, (2015) 39-45.
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.01.053
10. K. Fujikawa, C.H. Oh, and Chengjie Zhang, "Spin Operator and Entanglement in Quantum Field Theory", *Phys. Rev. D.*

90, (2014) 025028.

DOI: 10.1103/PhysRevD.90.025028

11. K. Fujikawa, C.H. Oh, and Chengjie Zhang, "Linearity of quantum probability measure and Hardy's model", *Int. J. Mod. Phys. A* 29, 1450017 (2014).

DOI:10.1142/S0217751X14500171

12. Xiao-Ming Lu, Sixia Yu, Kazuo Fujikawa, and C.H. Oh, "Improved Error-Tradeoff and Error-Disturbance Relations", *Phys. Rev. A* 90, 042113 (2014).

DOI:10.1103/PhysRevA.90.042113

13. K. Fujikawa, "Conditionally valid uncertainty relations", *Phys. Rev. A* 88, (2013) 012126 .

DOI: 10.1103/PhysRevA.88.012126

[学会発表](計 8 件)

1. K. Fujikawa, "Quadratic divergences and naturalness", Conference on new physics at the Large Hadron Collider, March 4, 2016, Singapore

2. K. Fujikawa, "Lorentz invariant CPT breaking", Memorial meeting for Abdus Salam's 90th birthday, January 25, 2016, Singapore

3. K. Fujikawa, "Yang-Mills theory and path integrals", 60 years of Yang-Mills gauge field theories, May 27, 2015, Singapore

4. K. Fujikawa, "Neutrino-antineutrino mass splitting in the Standard Model and baryogenesis", International conference on massive neutrinos, February 10, 2015, Singapore

5. K. Fujikawa, "A hidden-variables version of Gisin's theorem", Asia Pacific conference and workshop on quantum information sciences, December 14, 2014, Tainan, Taiwan

6. K. Fujikawa, "On neutrino masses via CPT violating Higgs interaction in the Standard Model", Aspects of supergravity, January 7, 2014, Stony Brook, USA

7. K. Fujikawa, "Conditionally valid uncertainty relations", Asia Pacific conference and workshop on quantum information sciences, December 16, 2013, Seoul, Korea

8. K. Fujikawa, "Uncertainty principle revisited", Conference in honor of 90th birthday of Freeman Dyson. August 28, 2013, Singapore

[図書](計 1 件)

1. K. Fujikawa and Y.A. Ono, (eds), "In memory of Akira Tonomura", (World Scientific, Singapore, 2014).

[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)

国立研究開発法人理化学研究所

仁科加速器研究センター

客員研究員

研究者番号：30013436