

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01226

研究課題名(和文) 低速中性子ビームを用いた未知相互作用の探索

研究課題名(英文) Search for new interaction using slow neutron beams

研究代表者

神谷 好郎 (Kamiya, Yoshio)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教

研究者番号：90434323

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,600,000円

研究成果の概要(和文)：冷中性子ビームとキセノン原子ガスとの散乱角度分布を精密に測定し、結合の弱い新しい相互作用の探索した。本実験手法はナノメートルスケールの物理に対して感度を持つことが知られている(PRL114, 161101(2015), 研究課題25870160(神谷))。本研究課題では、統計精度の改善と系統誤差の理解を進め、先の論文を越えた世界一の感度に到達する結果を得た。同時に、レプトン数とバリオン数で結合が異なる未知相互作用のモデルに対して、ナノメートルスケールで初めての制限を示した。発展として、感度改善の可能性と限界、超前方散乱を捉えるセンサーの開発、極冷中性子ビームでの実験設計を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1) 質量やバリオン数、レプトン数などを結合荷とする相互作用を探索した。これら結合荷による相互作用は時空構造を規定する物理と関連する可能性を秘めた物で、時空と重力の学術分野において大きな意義があると言える。

(2) 5ミクロンを切る高い空間分解能を有したイメージングセンサーを開発した。その成功を基に、物性物理分野や産業利用などへの活用可能性が検討され始めている。本研究で得られた知見は他分野や社会へ広く利用されるもので、この側面においても大きな意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have precisely measured the scattering angle distribution between a cold neutron beam and xenon atomic gas and have searched for a new weakly-coupled interaction. This method is known to be sensitive to nanometer-scale physics (PRL114, 161101 (2015), project 25870160 (Kamiya)). On top of those experiences, we improved statistical accuracy and understood systematic errors, then we achieved the world's highest sensitivity beyond the previous paper. We also presented the first experimental constraints to models of new interactions that differ in coupling between lepton and baryon numbers, in nano-meter scale. As further improvements, evaluations other candidates of scattering targets, development of sensors to detect super-forward scattering, and experimental design with a very-cold neutron beam were carried out.

研究分野：素粒子実験

キーワード：未知短距離力 低速中性子 時空構造 ピクセル検出器

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

- (1) 国内外の研究所において、未知相互作用の探索実験が行われてきた。
- (2) 場の量子論で記述される微視的スケールにおいては、未知相互作用は新しい媒介粒子の存在を意味するため、新粒子の探索という表現もされる。
- (3) また、未知相互作用が質量と結合する場合、一見して重力と区別がつかないことから、重力の逆二乗則を破る現象としても表われる。
- (4) 数ナノメートル程度の距離スケールでは、鉛などの物質との散乱過程を解析することで探索が行われてきた。
- (5) フランスのグループが示した探索結果が、当時の世界最高感度を持つ結果であったが、私たちの研究グループでは、安定的に運用されている高強度冷中性子ビームラインを用い、解析効率の高い解析手法の提案することで、より優れた探索感度を持つ実験を行ってきた(Y. Kamiya et al., Phys. Rev. Lett. 114, 161101(2015), 科研費研究課題 No.25870160(神谷))。
- (6) データの統計量が実験の感度を制限しており、より強度の高い冷中性子ビーム施設で実験することで、さらなる探索感度の改善が見込まれていた。

### 2. 研究の目的

- (1) 世界で指折りの冷中性子ビーム強度を持つ実験施設において、高統計を得る実験を行い、未知相互作用の探索の幅を広げること。
- (2) 高統計実験を行うにあたり新たに直面する系統誤差の同定と制御、補正の可能性と補正に伴う不定性を評価し、本実験手法のさらなる可能性と限界を評価すること。
- (3) 他のエネルギー(波長)帯の中性子ビームを用いた発展的実験の設計、系統誤差の評価と到達感度の推定を行うこと。
- (4) 発展的実験で必要となる、センサーなどの新規技術の開発とその評価をすること。
- (5) 研究で得られた知見を他分野や社会へ還元すること。

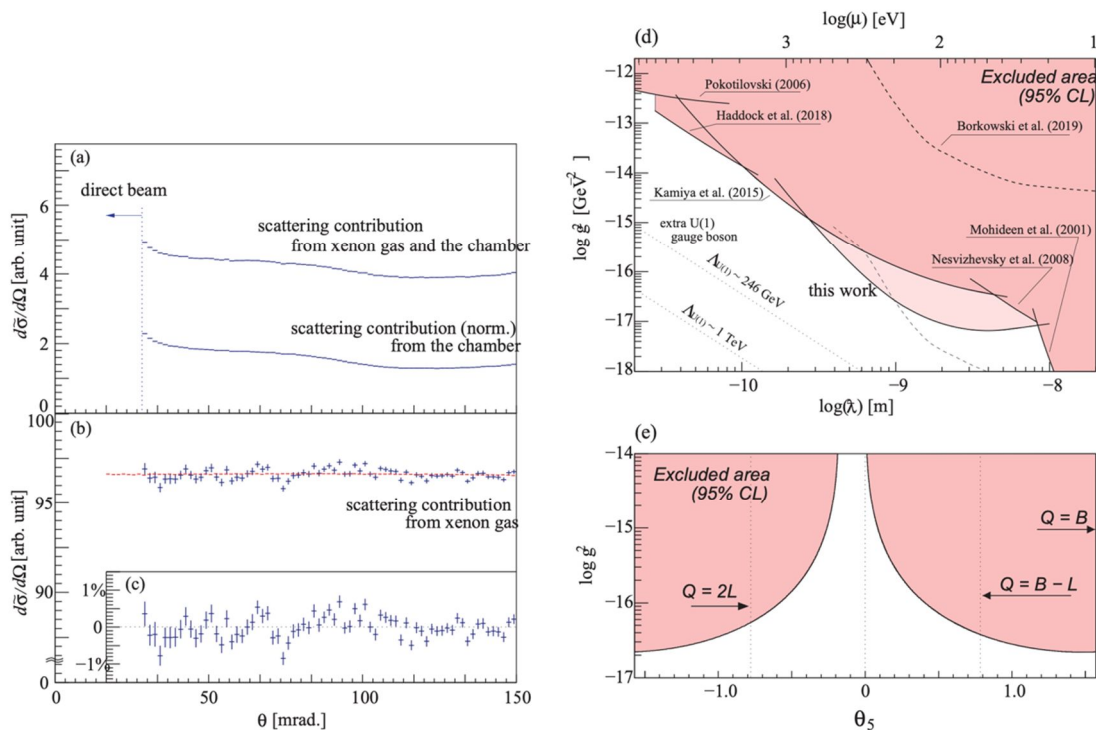
### 3. 研究の方法

- (1) 世界で運用されている冷中性子ビームラインの強度やユーザーの受入れ体制など状況の確認を行い、高統計での実験の機会を再検証した。
- (2) 実験はフランスの ILL 研究所での冷中性子ビームラインで行うこととした。主に物性研究に利用されているもので、本研究のような素粒子実験分野への応用の例は少なく、そのため、実験の意義やビームラインへの要望について他分野の研究者を交えた議論を重ね、共通認識を深めた。
- (3) キセノン原子ガスを封じるガスチャンバーの改修を行った。
- (4) 短い試験的なビームタイムを獲得し、実験機器の取り回しやビームラインへの接続、系統誤差の評価手法、データの取得状況などの確認を行った。
- (5) 複数の散乱ターゲットを試すことで、ターゲット原子の、熱運動の影響が正当に評価されていることを確認した。
- (6) 取得したデータを整理し、高次の電磁気相互作用による影響と新物理からの影響とを、最大尤度法を用いてそれぞれ評価した。
- (7) 得られる結果は、推定する物理定数が許され得る範囲の境界付近であることより、統一法と呼ばれる手法をもって評価した。

### 4. 研究成果

- (1) 新しい相互作用に対して、最も基本的な湯川型散乱ポテンシャルによる評価を行ったところ、新相互作用の到達距離が 0.3 ナノメートルから 8 ナノメートルの範囲において、世界最高感度での探索に成功した。(下図(d)参照)
- (2) 到達感度の範囲内に、新しい相互作用の兆候は見られなかったと結論付けた。
- (3) 素粒子の大統一理論などでレプトン数とバリオン数の混ざりが期待される。その低エネルギー極限への表れとして想定され得るものとしての、レプトン数とバリオン数を線形に混ぜ合わせた結合荷を持つ新相互作用に対して、世界で初めて、ナノメートルスケールでの制限を与えた。(下図(e)参照、近年他の大型実験においても、同様な物理の探索

- が広く行われている。それらの結果と相補的なものとなる。)
- (4) 散乱ターゲットの改善として、中性子の通る物質(窓)材の結晶性とその影響を計測/評価し、発展的実験における系統誤差の推定を行った。
  - (5) 新相互作用の探索領域を広げる方法として、ガスの高圧化などを含む散乱ターゲットの変更可能性、計測する散乱角度領域の拡張などを検討し、手法的/技術的な限界を評価した。
  - (6) より微細な散乱角構造を分析するため、CMOS イメージングセンサーを基とした、中性子用イメージングセンサーを開発した。空間分解能は、ラインスプレッドファンクションのシグマを評価値として、5ミクロンを切る。
  - (7) 極冷中性子ビームを利用した発展的実験研究の設計を行った。



図(成果論文 Y.Kamiya et al., AIP Conf. Proceedings 2319, 040017 (2021), Figure 2 より) (a) 測定された、中性子の散乱角度分布。(b) キセノン原子ガスからの散乱の寄与だけを抽出したもの。(c) 評価関数からの残差。(d) 研究で得られた湯川型の未知相互作用に対する新しい制限。(e) 到達距離を1ナノメートルとした際の、結合荷がバリオン数とレプトン数の線形結合として表されるモデルへの感度解釈。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Kamiya, R. Cubitt, L. Porcar, O. Zimmer, G. N. Kim, and S. Komamiya	4. 巻 2319
2. 論文標題 Experimental Search for Non-Newtonian Forces in the nanometer Scale with Slow Neutrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 040017-1 -4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0036985	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

1. 著者名 Kamiya Y., Miyoshi T., Iwase H., Inada T., Mizushima A., Mita Y., Shimazoe K., Tanaka H., Kurachi I., Arai Y.	4. 巻 979
2. 論文標題 Development of a neutron imaging sensor using INTPIX4-SOI pixelated silicon devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164400 ~ 164400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164400	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 Yoshiyuki Onuki, Johnny Alejandro Mora Grimaldo, Tatsuki Ose, Hiroaki Aihara, Yoshizumi Inoue, Yoshio Kamiya, Kenji Shimazoe, Takeshi Go Tsuru, Takaaki Tanaka, Kentaro Miuchi, Ayaki Takeda, and Yasuo Arai	4. 巻 924
2. 論文標題 Studies of radioactive background in SOI pixel detector for solar axion search experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 448-451
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2018.07.056	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 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 7件/うち国際学会 16件）

1. 発表者名 L. Zhang
2. 発表標題 Development and characterization of SOI based event driven neutron imaging sensor
3. 学会等名 AESJ Fall Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Miyoshi
2. 発表標題 Progress on SOI Pixel Sensors
3. 学会等名 VERTEX 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 低速中性子を用いた重力検証実験について
3. 学会等名 巨視的量子現象と量子重力(基礎研究会) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 L. Zhang
2. 発表標題 Development of a neutron imaging sensor based on event-driven silicon-on-insulator pixelated device
3. 学会等名 2021 Virtual IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Miyoshi
2. 発表標題 Application of SOI integration-type pixel sensors and up-to-date process
3. 学会等名 2021 Virtual IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 微視的スケールにおける等価原理の検証にむけて
3. 学会等名 Colloquium, Osaka Metropolitan University (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Toward the Verification of the Equivalence Principle in the Quantum Regime
3. 学会等名 Seminar, The University of Tokyo (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Testing Gravity with Quantum Bound Ultracold Neutrons
3. 学会等名 Seminar, Tokyo Institute of Technology (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Z. Wang
2. 発表標題 Quantum Gravity experimental initiative at the LANSCE UCN facility
3. 学会等名 23rd International Conference on General Relativity and Gravity - GR23 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Mitsui
2. 発表標題 INTPIX4NA 検出器を用いた中性子イメージングセンサーの開発
3. 学会等名 JPS Autumn Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Tsunomachi
2. 発表標題 高エネルギー量子線を用いたCMOSイメージングセンサーの空乏層厚の測定
3. 学会等名 第4回 量子線イメージング研究会 - QB12022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Testing the equivalence principle using a gravitationally bound quantum system: with a short report of technological developments
3. 学会等名 31th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan - JGRG25 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Measuring Time Developments of Gravitationally Bound Quantum States of UCN, toward an Understanding of the Equivalence Principle in the Quantum Regime - UCNQ
3. 学会等名 Seminar, Los Alamos National Laboratory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水原慎一
2. 発表標題 超冷中性子を用いた弱い等価原理の検証実験のためのシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Experimental Search for New Gravity-like Interactions in the Nanometer Range
3. 学会等名 22nd International Conference on General Relativity and Gravity - GR22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Testing the Weak Equivalence Principle using Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons
3. 学会等名 Physics of fundamental Symmetries and Interactions - PSI2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G. N. Kim
2. 発表標題 Search for New Gravity-like Forces at the 40 m SANS Beam Line of the HANARO Research Reactor
3. 学会等名 3rd Aisa-Oseania Conference on Neutron Scattering 2019 - AOCNS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Experimental Search for Non-Newtonian Forces in the Nanometer Scale with Slow Neutrons
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference - APPC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Development of a Neutron Imaging Sensor using INTPIX4, SOI Pixelated Silicon Devices
3. 学会等名 12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detector - HSTD12 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神谷好郎
2. 発表標題 中性子検出器の基礎物理実験への応用
3. 学会等名 第1回「中性子マイクロスコープの実現に向けた調査研究」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神谷好郎
2. 発表標題 超冷中性子による弱い等価原理検証実験の開発状況
3. 学会等名 弱値・弱測定の展望
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Development of Neutron Imaging Sensor using S01-XRPIX Detector
3. 学会等名 The 1st Workshop on Quantum Beam Imaging (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Experimental Search for New Gravity-like Forces in the Nanometer Scale with Slow Neutrons
3. 学会等名 Testing Gravity 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Search for New Gravity-like Short-range Interactions using Slow Neutrons Beams
3. 学会等名 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms - FPUA2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kamiya
2. 発表標題 Experimental Search for New Gravity-like Interactions using Slow Neutrons
3. 学会等名 Accelerating Universe in the Dark (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~kamiya/>

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
研究分担者	駒宮 幸男  (Komamiya Sachio)  (80126060)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・名誉教授   (12601)	

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			
米国	Los Alamos National Laboratory			
スイス	Paul Scherrer Institut	University of Geneva		
フランス	Institut Laue-Langevin			