

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02889

研究課題名（和文）時間反転対称性の破れの探索のための、偏極中性子による原子核反応の精密測定

研究課題名（英文）Precision measurement of nuclear reactions with polarized neutrons for time-reversal violation search

研究代表者

北口 雅暁 (Kitaguchi, Masaaki)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授

研究者番号：90397571

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：中性子偏極装置である $^3\text{He}$ スピンフィルターを開発し、J-PARC物質生命科学実験施設のパルス中性子ビームラインBL04 ANNRIに導入した。実際に $^{139}\text{La}$ 原子核の中性子吸収・複合核形成反応に伴うガンマ線の放出角分布が、入射中性子スピン方向に依存することを、世界で初めて観測した。非偏極・偏極中性子を用いた複数の実験で観測された角分布を原子核反応モデルを用いて解析した結果、原子核反応において時間反転対称性の破れが大きく増幅され、標準理論を超える物理に対して中性子電気双極子能率を凌駕する感度を持つことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の物質の起源を説明するための物質と反物質の性質の違いがCP対称性の破れであるが、現在の素粒子標準理論では十分に説明できていない。ある種の原子核反応では、基本的な素粒子反応における対称性の破れが増幅して観測される場合がある。本研究では偏極中性子ビームを用いて原子核反応を詳細に調べた。 $^{139}\text{La}$ 原子核の反応ではこの増幅が十分大きく、標準理論を超える物理法則の探索に利用できることがわかった。今回のデータは原子核反応を用いた時間反転対称性の破れの探索実験の基礎データとなる。

研究成果の概要（英文）：A high performance neutron polarizer with  $^3\text{He}$  was developed and installed into the beamline BL04 ANNRI in J-PARC. The angular distribution of gamma rays from neutron capture reaction of  $^{139}\text{La}$  was clearly observed with the polarized epithermal neutrons. The distributions with polarized and unpolarized neutrons were analyzed with the theory for nuclear reactions. The results tells us that the large enhancement of time-reversal violation in nuclear reaction can be used for search for new physics beyond the standard model with the sensitivity as high as neutron electric dipole moment search.

研究分野：素粒子原子核物理学

キーワード：中性子 時間反転対称性の破れ CP対称性の破れ 偏極中性子 原子核反応 J-PARC

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子標準模型のヒッグス粒子の発見により一定の完成を見たが、しかしその枠組みに収まらない実験・観測事実の存在は、標準模型を超える新物理の探索をさらに重要なものに行っている。標準模型が持つ CP 対称性破れの大きさは今日の物質優勢宇宙を形作れない。これは未発見の大きな CP 対称性の破れの源の存在を示唆している。大きな CP 非保存の探索で今日最も厳しい制限を与えているのは中性子電気双極子能率の探索である。中性子電気双極子能率には終状態相互作用の影響が含まれず、実験感度がそのまま探索感度になる点は有利である。同様に、中性子の前方散乱振幅にも終状態相互作用の影響が含まれないため、時間反転対称性非保存過程の高い感度での探索に利用することができる。具体的には中性子が原子核に共鳴吸収され、複合核状態を形成する過程に現れる時間反転対称性の非保存を探索する。

特定の原子核の中性子共鳴吸収反応では、パリティ対称性の破れが増幅するという現象が起こることが知られている。これは、複合核状態の s 波共鳴と p 波共鳴が長時間にわたって共存し、核子間相互作用にわずかに存在する弱い相互作用の影響が観測量に現れると説明されている。同様に、素過程に含まれる時間反転対称性の破れも原子核反応を通じて増幅される可能性がある。増幅効果の大きさによっては、中性子電気双極子能率による現在の時間反転対称性の破れの探索感度を超える測定感度を、現実的な実験時間で達成できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

原子核反応における対称性の破れの増幅は、複合核状態が部分波で展開でき、複合核状態を統計的に取り扱って良い(内部で特定の構造や運動を持たない)という理論的モデルに立脚している。この研究ではこれを確かめることを目的とした。(図1)

この理論の元では、中性子が共鳴吸収され特定のガンマ線を放出する過程における各種角相関項の係数が中性子スピン・原子核スピンの比で完全に書き下すことができる。(V.V Flambaum et al, Angular and polarization correlations in the (n,  $\gamma$ ) reaction (1984)) 本研究ではこの角相関項の係数を順次測定し、時間反転対称性の破れの増幅効果の裏付けを固める。

中性子共鳴吸収反応を用いた時間反転対称性の破れの探索は、各種電気双極子能率の探索とは別の系統誤差をもつ実験として、基本的 CP の破れの研究にとって重要なものである。また近年、特定の原子核では複合核に内部構造があるかもしれないという指摘もあり(P.E.Koehler, Fortschr. Phys., 61, 80-94 (2013))、原子核物理としても興味深い。

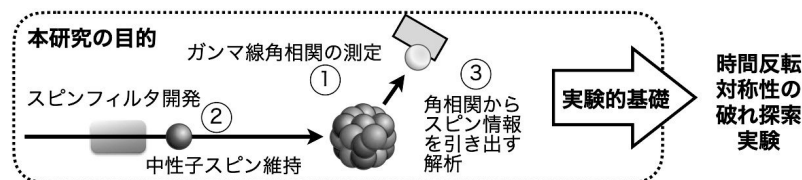


図1：本研究の目的と時間反転対称性の破れ探索との関係

### 3. 研究の方法

時間反転対称性を破れの増幅効果の大きさは複合核状態を部分波で展開した時の、反応の部分幅の比で書ける。この部分幅の比は、中性子が共鳴吸収され特定のガンマ線を放出する過程 (n,  $\gamma$ ) 反応)における各種角相関項の係数から求めることができる。そのため、(n,  $\gamma$ ) 反応でのガンマ線角分布を精度良く測定する必要がある。共鳴吸収に対応するエネルギーの中性子を利用できるビームラインにガンマ線検出器を設置し、その放出方向とエネルギーを取得する。角相関項は原子核スピンを用いて記述されるので、スピンのわかっているレベル間のガンマ線だけを取り出して、その放出角分布を調べることになる。(図2)

入射中性子をスピン偏極させることで、(n,  $\gamma$ ) 反応におけるスピンに依存する相関項を得ることができる。複数の相関項を統合的に解析することで、複合核を統計的に取り扱う理論モデルの妥当性を検証する。またそのモデルに基づいて時間反転対称性の破れの増幅の大きさを見積もる。

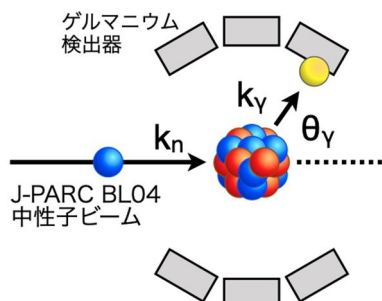


図2：J-PARC での線角分布測定の設定アップ。

### 4. 研究成果

まず、非偏極中性子を用いた実験を行った。大強度陽子加速器施設 J-PARC から得られるパルス中性子ビームを用いて、 $^{139}\text{La}$  原子核の  $(n, \gamma)$  反応を詳細に測定した。ビームライン BL04 (ANNRI) には高エネルギー分解能ガンマ線検出器 (ゲルマニウム検出器) が標的を取り囲むように設置されており、ガンマ線エネルギーごとに放出角分布を測定することができる。測定の結果、明瞭なガンマ線放出角分布が観測された (図 3)。(T. Okudaira et al., Phys. Rev. C 97, 034622 (2018))

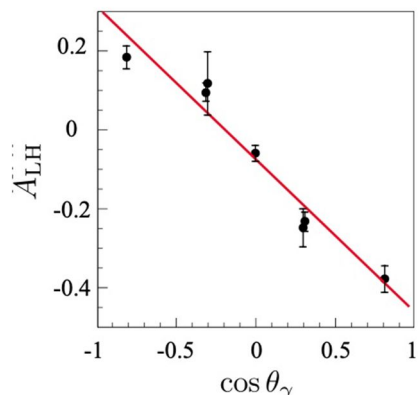


図 3 : J-PARC での  $^{139}\text{La}(n, \gamma)$  角分布測定。下図の横軸はガンマ線の放出角。縦軸は入射中性子のエネルギーの非対称を表していて、この結果は高いエネルギーの中性子が吸収されるとガンマ線は前方に出やすく、低いエネルギーの中性子の場合にはガンマ線は後方に出やすい、ということを示している。直線は「統計的取り扱い」モデルによるフィット。

さらに、入射中性子をスピン偏極させる装置「 $^3\text{He}$  スピンフィルタ」を開発、ビームラインに導入し、偏極中性子を用いた  $(n, \gamma)$  反応測定を行った。その結果、入射中性子のスピンの向きに応じてガンマ線の放出方向に偏りがあることを観測した (図 4)。(T. Yamamoto et al., Phys. Rev. C 101, 064624 (2020))

これらを統合的に解析した結果、 $^{139}\text{La}$  のガンマ線の放出角分布は原子核反応の統計的取り扱いで説明できそうであることがわかってきた。さらにそのモデルに基づくと時間反転対称性の破れの増幅率が  $10^6$  のオーダーであることが示唆された。つまりこの原子核を用いれば、素過程の時間反転対称性の破れを  $10^6$  倍に拡大して探索することができるということである。

現在これらの成果を踏まえ、時間反転対称性の破れ探索実験の詳細な計画立案に進んでいる。

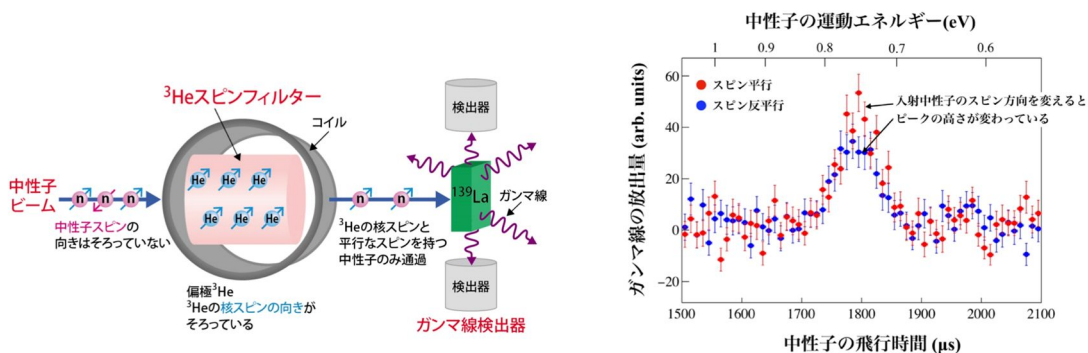


図 4 : 偏極中性子を用いた  $^{139}\text{La}(n, \gamma)$  角分布測定。左図はスピンフィルタを含めたセットアップの模式図。右図の横軸は中性子のエネルギーに対応。縦軸は一方の検出器で検出したガンマ線強度。入射中性子のスピンの向きに放出方向の非対称があることがわかる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yamamoto T., Shimizu H. M., Kitaguchi M., Hirota K., Okudaira T., Haddock C. C., Oi N., Ito I., Endo S., Takada S., Koga J., Yoshioka T., Ino T., Asahi K., Momose T., Iwata T., Sakai K., Oku T., Kimura A., Hino M., Shima T., Yamagata Y.	4. 巻 22
2. 論文標題 Development of a Neutron Spin Filter for a T Violation Search in Compound Nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Neutron Optics (NOP2017)	6. 最初と最後の頁 11018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.22.011018	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 Endo Shunsuke, Shimizu Hirohiko M., Kitaguchi Masaaki, Hirota Katsuya, Satoh Setsuo, Kai Tetsuya, Okudaira Takuya, Haddock Christopher C., Oi Noriko, Goto Fumiya, Ito Ikuya, Nakaji Masaya, Takada Shusuke, Koga Jun, Yoshioka Tamaki, Sakai Kenji	4. 巻 22
2. 論文標題 Development of High-Counting-Rate Neutron Detector for CP-Violation Search in Neutron-Induced Reactions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Neutron Optics (NOP2017)	6. 最初と最後の頁 11021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.22.011021	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 Kitaguchi Masaaki, Asahi Koichiro, Endo Shunsuke, Haddock Christopher C., Hino Masahiro, Hirota Katsuya, Ino Takashi, Ito Ikuya, Iwata Takahiro, Koga Jun, Miyachi Yoshiyuki, Momose Takamasa, Oi Noriko, Okudaira Takuya, Sakai Kenji, Shima Tatsushi, Shimizu Hirohiko M., Takada Shusuke, Yamagata Yutaka, Yamamoto Tomoki, Yoshioka Tamaki	4. 巻 22
2. 論文標題 Fundamental Physics Using High-Performance Optics	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Neutron Optics (NOP2017)	6. 最初と最後の頁 11034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.22.011034	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 Koga J., Takada S., Yoshioka T., Shimizu H. M., Hirota K., Okudaira T., Oi N., Ito I., Yamamoto T., Endo S., Haddock C. C., Kitaguchi M., Kimura A., Sakai K., Ino T., Asahi K., Momose T., Iwata T., Hino M., Shima T., Yamagata Y.	4. 巻 22
2. 論文標題 Measurement of (n,gamma) Reaction of 117Sn for T-Violation Search by Using Compound Nucleus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Neutron Optics (NOP2017)	6. 最初と最後の頁 11035
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.22.011035	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 Okudaira T., Shimizu H. M., Kitaguchi M., Hirota K., Haddock C. C., Oi N., Ito I., Yamamoto T., Endo S., Takada S., Koga J., Yoshioka T., Ino T., Asahi K., Momose T., Iwata T., Sakai K., Oku T., Kimura A., Hino M., Shima T., Yamagata Y.	4. 巻 22
2. 論文標題 Measurement of Angular Distributions in 139La(n,gamma) Reaction for T Violation Search	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Neutron Optics (NOP2017)	6. 最初と最後の頁 11041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.22.011041	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 Okudaira T., Takada S., Hirota K., Kimura A., Kitaguchi M., Koga J., Nagamoto K., Nakao T., Okada A., Sakai K., Shimizu H. M., Yamamoto T., Yoshioka T.	4. 巻 97
2. 論文標題 Angular distribution of rays from neutron-induced compound states of La140	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 34622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.97.034622	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 Takada S., Okudaira T., Goto F., Hirota K., Kimura A., Kitaguchi M., Koga J., Nakao T., Sakai K., Shimizu H.M., Yamamoto T., Yoshioka T.	4. 巻 13
2. 論文標題 Characterization of germanium detectors for the measurement of the angular distribution of prompt -rays at the ANNRI in the MLF of the J-PARC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P02018 ~ P02018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/13/02/P02018	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 Kitaguchi Masaaki	4. 巻 KMI2017
2. 論文標題 Search for unknown interaction with neutrons	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.294.0008	査読の有無 無
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 Yamamoto Tomoki, M. Shimizu H, Kitaguchi M., Hirota K., Okudaira T., Takada S., Okada A., Yoshioka T., Ino T., Sakai K., Asahi K., Momose T., Iwata T., Hino M., Shima T., Yamagata Y.	4. 巻 KMI2017
2. 論文標題 Measurement of angular correlation of (n,gamma) reaction with polarized neutrons	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.294.0049	査読の有無 無
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 Yamamoto T., Okudaira T., Endo S., Fujioka H., Hirota K., Ino T., Ishizaki K., Kimura A., Kitaguchi M., Koga J., Makise S., Niinomi Y., Oku T., Sakai K., Shima T., Shimizu H. M., Takada S., Tani Y., Yoshikawa H., Yoshioka T.	4. 巻 101
2. 論文標題 Transverse asymmetry of rays from neutron-induced compound states of La140	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.064624	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 Okudaira T., Oku T., Ino T., Hayashida H., Kira H., Sakai K., Hiroi K., Takahashi S., Aizawa K., Endo H., Endo S., Hino M., Hirota K., Honda T., Ikeda K., Kakurai K., Kambara W., Kitaguchi M., Oda T., Ohshita H., Otomo T., Shimizu H.M., Shinohara T., Suzuki J., Yamamoto T.	4. 巻 977
2. 論文標題 Development and application of a <sup>3</sup> He Neutron Spin Filter at J-PARC	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 164301 ~ 164301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164301	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11件(うち招待講演 1件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 M. Kitaguchi
2. 発表標題 Optical behavior from epithermal to ultra-cold neutrons
3. 学会等名 PPNS2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kitaguchi
2. 発表標題 Discrete symmetry in compound nuclei
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS (HAW2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kitaguchi
2. 発表標題 Measurement of angular distribution of $\gamma$ -rays in the resonance reaction of $^{139}\text{La}$ for T-Violation search experiment
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS (HAW2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Kitaguchi
2. 発表標題 Neutron Experiments at J-PARC
3. 学会等名 KMI2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北口雅暁
2. 発表標題 量子論的増幅効果と新物理探索
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Kitaguchi
2. 発表標題 Search for T-violation effects in compound neutron resonance at J-PARC
3. 学会等名 10th International Workshop on Fundamental Physics using Atoms (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Kitaguchi
2. 発表標題 Fundamental physics using high-performance optics
3. 学会等名 International Conference on Neutron Optics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北口雅暁
2. 発表標題 複合核状態における時間反転対称性の破れ 探索実験計画
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 山本知樹
2. 発表標題 複合核状態における時間反転対称性の破れ探索のための偏極中性子を用いた空間反転対称性の破れ測定
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本知樹
2. 発表標題 複合核反応を用いた時間反転対称性の破れ探索実験の全体概要
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本知樹
2. 発表標題 複合核共鳴における時間反転対称性の破れ探索に向けた偏極中性子による $^{139}\text{La}(n, \gamma)$ 反応の解析
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

〔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
研究 分担 者	吉岡 瑞樹	九州大学・先端素粒子物理研究センター・准教授	
	(Yoshioka Tamaki)		
	(20401317)	(17102)	

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