

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05864・19K21047

研究課題名(和文)熱外中性子偏極技術の開発と ^{139}La におけるCP対称性の破れの増幅率の最終決定研究課題名(英文)Development of techniques for epi-thermal polarized neutrons and determination of enhancement of CP-violation in ^{139}La

研究代表者

奥平 琢也 (Okudaira, Takuya)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：40826129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では $^{139}\text{La}+n$ 複合核におけるCP対称性の破れの増幅率決定のために、 ^{139}La の偏極中性子吸収に伴う γ 線放出角度分布測定を行うことを目的としている。本研究ではまず中性子偏極デバイス： ^3He スピンスピンフィルタの開発を行い、J-PARCで性能の良い ^3He スピンスピンフィルタを開発することに成功した。本装置をJ-PARCの中性子ビームラインANNRIに導入し、 ^{139}La の偏極中性子吸収時に放出される γ 線の角度分布を測定したところ、特定の遷移で放出される γ 線に中性子スピン方向依存する角度分布が存在することを発見した。現在この結果を解釈するための理論的研究が共同研究者と共に進められている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在我々の宇宙には反物質はほとんど存在せず、物質のみで構成されている。これを説明するためには既存の理論体系を超えるようなCP対称性の破れが存在しているはずであるが、未だ未発見である。本研究は原子核の中性子吸収反応時にCP対称性の破れが増幅される現象を利用して、未知の物理現象探査計画の一環であり、原子核内におけるCP対称性の破れの増幅率の決定に大きく貢献する。また、本研究で開発した中性子ビームの偏極技術は物性研究や、生命科学、工学など様々な分野への応用が可能である。特に1eV程度のエネルギーが高い中性子の偏極がJ-PARCで実現されたことは今後の中性子科学の発展に大きく貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to determine an enhancement factor of the CP-violation in compound nuclei of $^{139}\text{La}+n$ by measuring an angular distribution of gamma-rays emitted in polarized neutron absorption reactions of ^{139}La . First, We developed high quality ^3He spin filters in J-PARC to polarize a neutron beam. Then, the ^3He spin filter was installed to a neutron beam line ANNRI, and the angular distribution of gamma-rays were measured with a germanium detector assembly. As a result, the angular distribution of gamma-rays depending on the neutron spin direction was found in the transition from $^{139}\text{La}+n$ state to ground state of ^{140}La . The theoretical study to interpret this result is now ongoing with collaborators.

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：原子核反応 (n,)反応 中性子 中性子偏極 ^3He 核偏極

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

^{139}La , ^{131}Xe などが運動エネルギー 1eV 程度の中性子(熱外中性子)を共鳴吸収する反応において、パリティが異なる二つの状態が干渉する事で、弱い相互作用起因のパリティ対称性の破れが最大 10^6 倍増幅される現象が観測されている。この反応において CP 対称性の破れにも同様の増幅効果があることが理論的に予言されている。現在、クォーク間相互作用で未知の CP 対称性の破れがないことを最も強く制限している実験は中性子電気双極子能率(n-EDM)探索であり、50 年以上に渡って探索が続けられているが、本手法では原子核内で CP を破る相互作用がある場合、それを非常に大きく増幅して観測できるため、全く新しい手法で未知の CP 対称性の破れを世界最高感度で探索できる可能性がある。しかし、その増幅率は全ての核種で未知であり、この手法が持つ可能性を具体的に議論できていなかった。CP 対称性の破れの増幅率は、中性子吸収による原子核の共鳴状態を部分波展開した時の部分幅の比で書ける。この部分幅の比は、原子核の無偏極及び、偏極中性子吸収に伴う γ 線の放出角度分布を測定することで決定できる。申請者は J-PARC 中性子ビームライン 4 番に設置された大立体角 Ge 検出器群を用いて、まず無偏極中性子で複数の核種について測定を行なった。解析の結果、 ^{139}La の部分幅の比として二つの解を得た。この二つの解から ^{139}La の CP 対称性の破れの増幅率を求めると、 1.0×10^6 倍もしくは 4.9×10^6 倍と、非常に大きいことを見出した。ただし、部分幅の比を一つに絞り込むためには偏極中性子を用いた実験が必要であるため、現在どちらの解が正しいのかわかっていない状況である。そこで本研究では【 ^{139}La の CP 対称性の破れの増幅率はいくつであるのか】を問いとして設定する。

2. 研究の目的

^{139}La の CP 対称性の破れの増幅率を決定する。このために ^{139}La の偏極中性子吸収反応によって放出される γ 線の角度分布を測定する。

3. 研究の方法

まず ^{139}La の共鳴吸収エネルギーである 0.74eV の中性子をスピン偏極させるための中性子偏極デバイス: ^3He スピンフィルタを開発する。そして ^3He スピンフィルタを J-PARC の中性子ビームライン ANNRI に導入し、 ^{139}La の偏極中性子吸収反応に伴う γ 線を測定する。

4. 研究成果

本研究ではまず申請者が構築した ^3He スピンフィルタ作製の清純な真空システムを用いて、3 個の ^3He スピンフィルタを作製した。当初は核偏極緩和時間は 60h 程度と長くなかったが、作製プロセスを見直し、偏極緩和時間 150h 程度の ^3He スピンフィルタを作製することに成功した(図 1)。

本実験では中性子の運動方向と垂直方向に中性子スピンを向ける必要があるため、図 2 のような偏極保

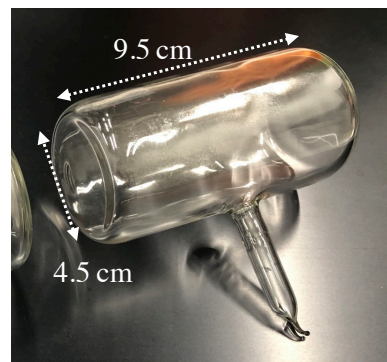


図 1 今回の実験で使用した ^3He スピンフィルタ

持用のコイルを開発し、試料上流部に導入した。 ^3He スピンフィルタの核偏極をビームライン上で保つためには均一な磁場を印加しておく必要があるが、中性子ビームライン上に存在する放射線防護用の鉄遮蔽によって、磁場が乱されることが予想された。そこで三次元磁場シミュレーションを駆使し、ソレノイドの両端に補償コイルを設置することで、コイル中心部の磁場の一様性を担保し、磁場不均一性によって ^3He の偏極が壊れることを抑制した。このコイルを用いてビームに対して横方向に 1.5 mT 程度の磁場を印加することで、 ^3He 原子核のスピンド方向を横向きにする。 ^3He スピンフィルタを透過した後、中性子ビームのスピンドが試料に到達するまでに壊れることを防ぐために、ビーム経路にガイド磁石を設置した。実験中はコイル内部に設置した NMR 用コイルで振動磁場を印加し、定期的に ^3He スピンドを反転することで、中性子スピンドの向きを反転させた。

スピンド up, down に対する測定データの差を取ることで、様々な系統的不確かさをキャンセルすることができ、精度の良い測定が可能となる。

本装置を用いることで 0.74eV の中性子に対して 30% 程度の中性子偏極率を得ることに成功した。 ^{139}La 試料に偏極中性子を照射し、p 波共鳴を形成した後に γ 線を放出する過程を調べたところ、 ^{140}La の基底状態に遷移する際に放出される 5161keV の γ 線に、中性子スピンド方向依存する角度分布が存在することが世界で初めて発見された(図 3)。

この角度分布から $^{139}\text{La}+n$ 複合核における CP 対称性の破れの増幅率を決定することが可能である。このための理論的検討が原子核理論グループと行われており、さらなる詳細な研究が必要ではあるが、 4.9×10^6 倍の解が有力であることがわかった。

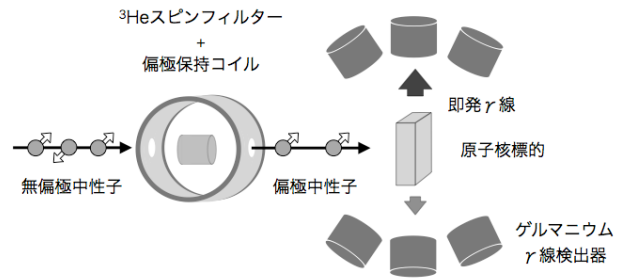


図 2 ^3He スピンフィルタを導入した BL04 ANNRI の模式図。偏極された中性子が標的に照射され、放出 γ 線を周囲を取り囲む 22 個のゲルマニウム γ 線検出器で捉える

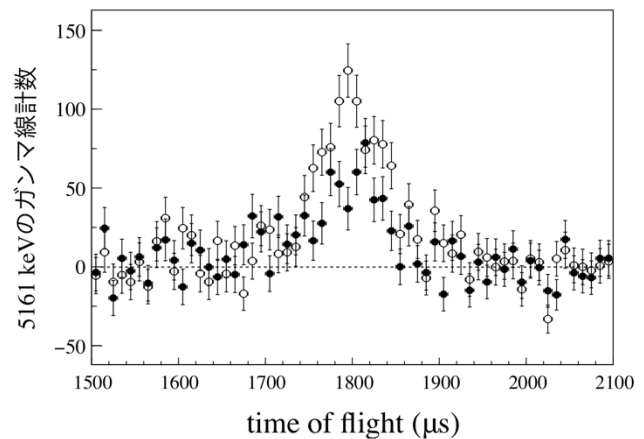


図 3 スピンド方向が異なる中性子を照射した時の下側の Ge 検出器で測定した即発 γ 線計数。黒丸と白丸は中性子スピンド方向の違いを表す。1800 μs の共鳴領域にてスピンド方向に応じて計数が異なる

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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., 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 γ 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 Takuya et al.	4. 巻 219
2. 論文標題 Measurement of the angular distribution of γ -rays after neutron capture by ^{139}La for a T-violation search	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 09001 ~ 09001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201921909001	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 Takuya et al.	4. 巻 KMI2019
2. 論文標題 Development of the neutron polarizer for the T-violation search using compound nuclei	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 POS	6. 最初と最後の頁 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.356.0029	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 Yamamoto Tomoki, Shimizu Hirohiko M., Ishizaki K., Niinomi Y., Kitaguchi Masaaki, Takada Shunsuke, Koga Jun, Makise S., Yoshioka Tamaki, Kimura Atsushi, Sakai Kenji, Oku T., Okudaira Takuya, Endo Shun, Tani Y., Fujioka Hiroyuki, Yoshikawa H., Hirota Katsuya, Shima Tatsushi	4. 巻 KMI2019
2. 論文標題 Verification of the compound nuclear model for T-violation search	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 POS	6. 最初と最後の頁 42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.356.0042	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 011018(7)
2. 論文標題 Measurement of Angular Distributions in $^{139}\text{La}(\text{n}, \gamma)$ 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 011018(7)
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., 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 ^3He 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Takuya Okudaira et al.
2. 発表標題 Polarized pulsed neutrons using a ^3He spin filter with an in-site SEOP method
3. 学会等名 European Conference on Neutron Scattering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Okudaira et al.
2. 発表標題 Development and applications of a ^3He spin filter for utilization of polarized neutrons
3. 学会等名 J-PARC symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Okudaira et al.
2. 発表標題 Development of the neutron polarizer for T-violation search using compound nuclei
3. 学会等名 KMI2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Okudaira, H.M.Shimizu, M.Kitaguchi, K.Hirota, C.C.Haddock, I.Ito, T.Yamamoto, S.Endo, K.Ishizaki, T.Sato, S.Takada, J.Koga, T.Yoshioka, T.Ino, K.Asahi, T.Momose, T.Iwata, K.Sakai, T.Oku, A.Kimura, T.Nakao, M.Hino, T.Shima, Y.Yamagata
2. 発表標題 Measurement of the angular distribution of γ -rays from neutron-induced compound states of ^{139}La for T-Violation Search
3. 学会等名 International Workshop on Particle physics at Neutron Sources (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Okudaira
2. 発表標題 Studying discrete symmetry violation in neutron-nucleus system
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥平琢也 奥隆之, 酒井健二, 猪野隆, 林田洋寿, 廣井孝介, 篠原武尚, 加倉井和久, 相澤一也
2. 発表標題 JAEAにおける 偏極 ^3He 中性子スピフィルター開発の現状
3. 学会等名 日本中性子科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Okudaira, T. Oku, K. Sakai, T. Ino, H. Hayashida, K. Hiroi, T. Shinohara, K. Kakurai, K. Aizawa, H. M. Shimizu, M. Kitaguchi, T. Yamamoto
2. 発表標題 Development of the neutron polarizer for the T-violation search using compound nuclei
3. 学会等名 The 4th KMI International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥平琢也, 奥隆之, 酒井健二, 廣井孝介, 篠原武尚, 相澤一也, 猪野隆, 林田洋寿, 加倉井和久, 清水裕彦, 北口雅暁, 山本知樹, 佐藤匠, 新實裕大
2. 発表標題 複合核における時間反転対称性の破れ探索に向けた中性子偏極デバイスの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥平琢也
2. 発表標題 中性子偏極デバイス 3Heスピントフィルタの開発と利用
3. 学会等名 日本物理学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥平琢也, 奥隆之, 高橋慎吾, 猪野隆, 酒井健二, 廣井孝介, 相澤一也, 林田洋寿, 加倉井和久
2. 発表標題 J-PARCにおける3Heスピントフィルタの開発
3. 学会等名 量子ビームサイエンスフェスタ (招待講演)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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