

令和 6 年 6 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14495

研究課題名（和文）未知のCP対称性の破れ探索のための、中性子偏極デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of the neutron polarization device for the CP-violation search

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では原子核の中性子吸収反応を用いたCP対称性の破れ探索に不可欠な中性子ビームのスピンの偏極デバイス： ^3He スピンフィルターの開発を行った。 ^3He スピンフィルターは偏極 ^3He 原子核の中性子吸収反応を用いて中性子ビームを偏極させるデバイスであり、複数個の ^3He ガスセルを作製した。 ^3He ガスを偏極するためのレーザー装置をJ-PARCに構築して80%程度の高 ^3He 偏極率を達成できることを確認した。本装置を用いて原子核が偏極中性子を吸収した際に放出される線の角度分布の測定、偏極Laと偏極中性子のスピン依存する断面積の測定などに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した ^3He スピンフィルターを用いて世界最大強度を誇るJ-PARCの中性子ビームを幅広いエネルギー領域において偏極することに成功した。本デバイスを用いて測定した原子核の中性子断面積のスピン依存性から ^{139}La におけるCP対称性の破れの増幅率を決定することに成功した。これはCP対称性の破れ探索に対して非常に大きなマイルストーンである。本デバイスはCP対称性の破れ探索のみならず中性子ビームを用いた広範な科学領域にわたり高い有用性を持つことから、今後様々な中性子実験に応用させることが期待される。

研究成果の概要（英文）：We have developed a neutron beam spin-polarization device: a ^3He spin filter, which is indispensable for the CP violation search using a neutron absorption reaction by nuclei. The ^3He spin filter is a device to polarize a neutron beam by using neutron absorption reaction of polarized ^3He nuclei. A laser system for polarizing ^3He gas was constructed at J-PARC, and it was confirmed that a high ^3He polarization of about 80% can be achieved. An angular distribution of gamma-rays emitted from the polarized neutron absorption reaction by nuclei and a spin dependent absorption cross section of polarized La and polarized neutrons were successfully measured using this device.

研究分野：素粒子原子核物理

キーワード：偏極中性子 核偏極 CP対称性の破れ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

^{139}La , ^{131}Xe , ^{117}Sn などの中重核が、運動エネルギー 1eV オーダーの中性子を共鳴吸収する反応では、パリティが異なる二つの状態が干渉することで、弱い相互作用起因のパリティの破れが最大 10^6 倍と非常に大きく増幅される現象が知られている。この反応では CP 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。申請者らは本過程を用いて CP 対称性の破れを高感度で探索することを計画している。CP の破れの探索には偏極した核標的を用意し、偏極中性子に対する吸収断面積を測定する。このためには中性子を偏極するデバイスが必要となる。

2. 研究の目的

CP の破れ探索には CP の破れの増幅率が大きいと予測される ^{139}La を用いることが検討されている。そこで本研究では ^{139}La の中性子共鳴吸収エネルギーである 0.75eV の中性子ビームを偏極するための中性子偏極デバイス： ^3He スピンフィルターを開発する。本デバイスは ^3He 原子核が反平行スピンを持つ中性子しか吸収しないことを利用し中性子ビームを偏極する。高い偏極率の ^3He ガスを生成し、 0.75eV の中性子ビームにて高い偏極率を達成する。

3. 研究の方法

高い ^3He 偏極率を達成するために Rb と K を用いた Hybrid 光ポンピング法を導入する。このために新たに超高真空化で ^3He ガス、Rb、K が封入されたガラスセルを作製する。また ^3He 偏極用の大強度レーザーシステムを構築する。これらを用いて ^3He 原子核を偏極し、その ^3He 偏極緩和時間と到達 ^3He 偏極率から中性子偏極デバイスとしての性能を評価する。これらの中性子ビームラインに導入し、実際に中性子ビームを偏極する。偏極中性子ビームを用いた物理実験に使用する。

4. 研究成果

本研究では J-PARC に構築されたガス封入用の真空システムを用いて複数個の ^3He ガスセルを作成した。作成した 6 個のガラスセルのうち、5 個では 150 時間以上の十分に長い ^3He 偏極緩和時間を有することを確認した。ここから高い歩留まりで性能の良い ^3He ガスセルを作成できたと言える。

^3He スピンフィルターを実際に使用する J-PARC 物質生命科学施設(MLF)内にて ^3He 偏極用のレーザー光学系を開発した。110W の大強度、狭帯域のファイバーレーザーを使用したレーザーシステムを作製し、MLF 内に ^3He 偏極環境、 ^3He スピンフィルターの運用環境を構築した。本装置を用いて、3 気圧の ^3He ガスが封入された 9cm 厚の ^3He スピンフィルターを偏極し、80%程度の高い ^3He 偏極率を達成した。

本装置は主に J-PARC ビームライン 04 およびビームライン 22 に導入され、偏極中性子ビーム実験を行った。ビームライン 04 には大立体角のゲルマニウム検出器が設置されており、原子核が中性子を吸収した際の 線の高いエネルギー分解能で測定することができる。本実験では空間反転対称性の破れが大きく増幅されている ^{139}La および ^{117}Sn が中性子を吸収した際に放出される 線の中性子偏極方向に対する角度分布を測定した。その結果それぞれの核種において有意な 線角度分布が存在していることが発見された。この時の中性

子の偏極率は、0.75eV に対して 40%程度を達成した。本成果をもとにこれらの原子核に対して CP 対称性の破れの増幅メカニズムを検証する解析が進んでいる。

ビームライン 22 での実験では ^{139}La を 6.8T, 68mK 下で 4%程度核偏極させ、 ^3He スピンフィルタを用いて偏極させた中性子ビームを照射した。中性子透過率の中性子スピン依存性を測定することにより、 ^{139}La の中性子吸収断面積のスピン依存性を測定することに成功した。これは CP 対称性の破れ探索に対して大きなマイルストーンとなる成果である。この時の中性子ビームの偏極率は 0.75eV に対して 40%であった。

本研究で J-PARC で実際に ^3He スピンフィルタを偏極、運用し、物理成果を得ることに成功したことから、 ^3He スピンフィルタの高い有用性を示すことができたと言える。今後 ^3He スピンフィルタを利用した更なる成果の創出が期待される。

本研究では中性子ビーム偏極率は 40%程度であり、これは物理成果を得るために十分な性能であると言えるが、さらに高い偏極率を達成することが可能である。ガスセルに封入する ^3He ガス量を増大させることにより中性子ビームの偏極率を 70-80%程度まで上昇させることができると予想される。より高い偏極率の中性子ビームを目指し、大容量 ^3He ガスセルの開発に関する研究を継続する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Endo S., Okudaira T., Abe R., Fujioka H., Hirota K., Kimura A., Kitaguchi M., Oku T., Sakai K., Shima T., Shimizu H. M., Takada S., Takahashi S., Yamamoto T., Yoshikawa H., Yoshioka T.	4. 巻 106
2. 論文標題 Measurement of the transverse asymmetry of the gamma-rays in the $^{117}\text{Sn}(n,\gamma)^{118}\text{Sn}$ reaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.106.064601	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 Ino Takashi, Fukumura Seiso, Strasser Patrick, Fujita Masaki, Ikeda Yoichi, Kanda Sohtaro, Kitaguchi Masaaki, Nishimura Shoichiro, Oku Takayuki, Okudaira Takuya, Shimizu Hirohiko M., Shimomura Koichiro	4. 巻 37
2. 論文標題 Optically Polarized Alkali Metal Cell for Muonic Helium Measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 24th International Spin Symposium (SPIN2021)	6. 最初と最後の頁 21208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/jpscp.37.021208	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 Fukumura Seiso, Strasser Patrick, Ino Takashi, Oku Takayuki, Okudaira Takuya, Kanda Sohtaro, Kitaguchi Masaaki, Shimomura Koichiro, Shimizu Hirohiko M., Torii Hiroyuki A., Nishimura Shoichiro	4. 巻 262
2. 論文標題 Proposal for new measurements of muonic helium hyperfine structure at J-PARC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01012 ~ 01012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202226201012	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., Endo S., Fujioka H., Hirota K., Ishizaki K., Kimura A., Kitaguchi M., Koga J., Niinomi Y., Sakai K., Shima T., Shimizu H. M., Takada S., Tani Y., Yamamoto T., Yoshikawa H., Yoshioka T.	4. 巻 104
2. 論文標題 Energy-dependent angular distribution of individual gamma rays in the $^{139}\text{La}(n,\gamma)^{140}\text{La}$ reaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.104.014601	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 奥平琢也	4. 巻 32
2. 論文標題 J-PARC における高性能 3He 中性子スピンフィルタの開発とその先導研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 波紋	6. 最初と最後の頁 76-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 T.Okudaira for NOPTREX collaboration
2. 発表標題 Search for time reversal violation in neutron-nucleus resonance interactions
3. 学会等名 KMI symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥平琢也 for NOPTREX collaboration
2. 発表標題 複合核における離散的対称性の破れの増幅
3. 学会等名 Fundamental Physics Using Reactor (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥平琢也 for NOPTREX collaboration
2. 発表標題 複合核における時間反転対称性破れの探索 -偏極原子核の中性子吸収断面積測定-
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥平琢也 for NOPTREX collaboration
2. 発表標題 複合核を用いた時間反転対称性の破れの探索と それに向けた複合核反応の基礎研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤駿典 for NOPTREX collaboration
2. 発表標題 $^{139}\text{La}(n, \gamma)^{140}\text{La}$ 反応により生じるガンマ線の円偏光度の測定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福村省三, PatrickStrasser, 猪野隆, 奥隆之, 奥平琢也, 神田聡太郎, 北口雅暁, 清水裕彦, 下村浩一郎, 鳥居寛之, 西村昇一郎,
2. 発表標題 J-PARCにおけるミュオンニックヘリウム超微細構造精密測定及びミュオンニックヘリウム偏極用SEOP装置の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥平琢也, 安部亮太, 石崎貢平, 伊東佑起, 遠藤駿典, 奥隆之, 亀田健斗, 北口雅暁, 木村敦, 酒井健二, 嶋達志, 清水裕彦, 高田秀佐, 広田克也, 藤家拓大, 藤岡宏之, 吉岡瑞樹, 吉川大幹
2. 発表標題 複合核における時間反転対称性破れの探索-実験の計画と偏極原子核の中性子吸収断面積測定-
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥平琢也
2. 発表標題 Neutron Polarization device using polarized ^3He
3. 学会等名 Fundamental Physics Using Atoms 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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 スピフィルターの開発と利用
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥平琢也
2. 発表標題 J-PARCにおける ^3He スピフィルターの開発と利用
3. 学会等名 日本中性子科学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥平琢也
2. 発表標題 J-PARCにおける ^3He スピフィルターの開発と利用
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

1. 発表者名 奥隆之
2. 発表標題 デバイス開発 ~中性子偏極技術等の開発と利用を中心に~
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		
米国	Indiana University	University of South Carolina	