

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04950

研究課題名(和文) 高偏極熱外中性子ビームを用いた複合核共鳴の全角運動量測定手法の確立

研究課題名(英文) Development of determination method for neutron resonance spin using polarized neutron beam

研究代表者

遠藤 駿典 (Endo, Shunsuke)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究職

研究者番号：10851850

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)：中性子を原子核が吸収して形成される複合核共鳴の全角運動量(スピン)の効率的かつ正確な決定手法の確立を目指して、偏極中性子捕獲反応から生じるガンマ線の円偏光度の測定に基づく手法の開発を行った。円偏光を測定する装置としてガンマ線ポラリメータを新たに開発し、性能評価試験を行った。性能評価試験の結果、円偏光に対し2%程度の感度を有することが確認され、またJ-PARC MLF ANNRIにおいて実際に偏極中性子捕獲反応で生じるガンマ線の円偏光度の測定に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複合核共鳴のスピンは原子核物理において反応を記述する基本的なパラメータであり、また原子力工学や天体核物理分野において重要なアイソマー生成分岐比にも関連するパラメータである。しかしながら測定が困難であり、核データ評価済ライブラリにはランダムに割り振られた不正確な値が収録されている場合が多い。このような現状を打開するため新たな手法の開発に取り組んだ。開発した円偏光測定装置は共鳴のスピンのみならず多数の励起状態のスピンにも利用できる。今後はそのような測定を実施しデータの正確性の向上に資することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：Aiming to establish an efficient and accurate method for determining the total angular momentum (spin) of compound nuclear resonances formed by the absorption of neutrons by atomic nuclei, a technique was developed to measure the circular polarization of gamma rays produced from polarized neutron capture reactions. A new gamma-ray polarimeter was developed as the device for measuring circular polarization, and performance evaluation tests were conducted. The results of the performance evaluation tests confirmed that the device has a sensitivity of approximately 2% to circular polarization. Additionally, the circular polarization of gamma rays produced by polarized neutron capture reactions was successfully measured at J-PARC MLF ANNRI.

研究分野：核データ

キーワード：円偏光ガンマ線 偏極中性子 複合核共鳴 スピン パルス中性子源

1. 研究開始当初の背景

原子核が中性子を捕獲して形成される複合核状態はスピン(全角運動量)などの自由度を定義できる準安定な状態である。ある特定のエネルギーの中性子を入射すると、非常に大きく吸収される現象が確認されており、これは共鳴と呼ばれている。特に中性子の軌道角運動量が 0 で捕獲される共鳴は s 波共鳴と呼ばれており、一般的に中重核においては入射中性子エネルギーが低い領域においては、s 波共鳴が断面積を形成する主要な成分となる。s 波共鳴ではスピンは元の核スピン I に対し、 $I \pm 1/2$ のいずれかをとる。このように 2 つの内いずれかの値しか取らないにも関わらず、共鳴のスピンは測定が困難であり、実験的に決定されている例は少ない。したがって、我が国の JENDL をはじめとした各国が整備している核データ評価済みライブラリには、ランダムに割り振られた値が収録されている場合が多く、正確性が大きな問題となっている。共鳴のスピンは原子力工学や核医学、天体核物理分野で重要となるアイソマー分岐比や核物理分野においては反応を記述する基本的なパラメータである。より汎用な核データの利用のために、共鳴のスピンの決定を正確かつ効率的に行う手法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では共鳴の決定手法の確立を目指した。共鳴のスピンの測定は以下のような手法が提案されている。

A 偏極核標的と偏極中性子の透過測定[1]

B γ - γ 相関の測定[2]

C 偏極中性子捕獲によるガンマ線の円偏光度の測定[3]

A の手法は最も正確に決定できる手法であるが、核偏極標的を用意するのが困難である場合が多く、測定はほとんど行われていない。B の手法は核構造分野で多く用いられている一般的な手法であるが、同時計数測定による計数率の減少が問題となる。特に共鳴のスピンを決定する場合、共鳴から放出されるガンマ線のコインシデンス測定が必要であり、効率的な測定が困難となる。C の手法は理論的な提案はされているものの、これまで測定が行われたのは熱中性子領域[4,5]のみであり、共鳴に対して測定が行われたことはなかった。そこで本研究では C の手法に関して、測定技術を開発し共鳴のスピンの決定手法の確立を目指した。

3. 研究の方法

共鳴のスピンを偏極中性子入射によるガンマ線の円偏光度測定により決定するための開発として、中性子偏極装置の製作・導入(1)と、ガンマ線の円偏光を測定する装置としてガンマ線ポラリメータの開発(2)を行った。

(1) 中性子偏極装置は ^3He スピンフィルター[6]を用いた。 ^3He スピンフィルターは偏極した ^3He 原子核の中性子捕獲断面積が偏極方向に強く依存していることを利用して、中性子を偏極させる装置である。 ^3He 原子核はルビジウム原子の電子を円偏光レーザーにより偏極させ、スピン交換により偏極させる。このような装置は大強度陽子加速器施設の物質生命科学実験施設(J-PARC MLF)にて既に実用化されていた。本研究ではこれを実験装置のあるビームライン 04(ANNRI)に導入し、偏極中性子ビームを得た。この際、 ^3He の原子核は外部磁場等による影響で時間経過とともに減偏極していく。この減偏極を抑えるため磁気シールドを含むコイルごと ANNRI に導入できるようにし、偏極緩和時間の長時間化を図った。

(2) ガンマ線の円偏光は偏極した電子との散乱である磁気コンプトン散乱[7,8]を用いて測定することができる。偏極した電子は強磁性体に磁場をかけることで用意できる。したがって、ポラリメータとして Fe-Co 合金であるパーメンジュール材をコアとした電磁石を作成した。ポラリメータの性能評価指標として磁気ヒステリシスと円偏光に対する感度に相当する偏極分解能がある。ポラリメータは磁気ヒステリシスの飽和領域で使用する必要がある。また測定された非対称度から円偏光度を求める際に必要となるのが偏極分解能である。これらの性能指標を評価するために以下の 2 つの実験を行った。

① 円偏光ガンマ線ビームを用いた測定

分子科学研究所 極端紫外光研究施設(UVSOR)の BL1U ではレーザーコンプトン散乱現象によりガンマ線ビームが生成[9,10]できる。入射するレーザーを円偏光にすることで、円偏光ガンマ線が得られる。本研究ではこの円偏光ガンマ線ビームの円偏光の向きによるポラリメータの透過率を測定することで、磁気ヒステリシスと偏極分解能を得た。

② 硫黄-32 の偏極中性子捕獲により生じる円偏光ガンマ線を用いた測定

J-PARC MLF ANNRI における中性子捕獲反応で生じるガンマ線の円偏光度測定の実証研究として、硫黄標的に偏極させた熱中性子を照射し発生するガンマ線の円偏光度の測定を行った。硫黄-32 の偏極熱中性子を捕獲した際に放出される 5.4 MeV のガンマ線は 50% 円偏光していることを利用して、円偏光測定の実証をおこなった。

4. 研究成果

(1) ANNRI での偏極中性子の生成

^3He スピンフィルターを ANNRI に導入し、偏極中性子ビームを生成した。図 1 は得られた ^3He 原子核の偏極率の時間変化を示している。 ^3He の偏極率の時間変化を $P_{\text{He}} = P_0 \exp(-t/\tau)$ とした時の、偏極緩和時間 τ は 139 時間と得られた。またインストール直後の偏極率は 82% であった。これにより比較的長時間に渡り ANNRI にて高い偏極率の中性子ビームを得ることができるようになった。

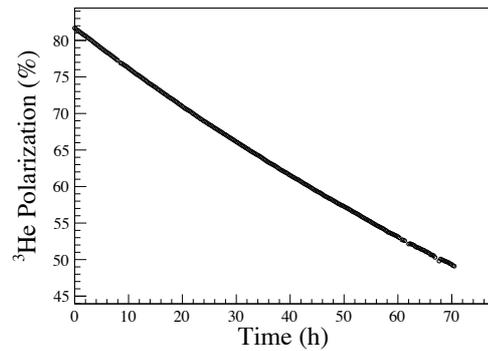


図 1 ^3He 原子核の偏極率の時間変化

(2)-① 円偏光ガンマ線ビームを用いた測定

UVSOR BL1U にて 6.6 MeV の円偏光ガンマ線ビームを生成し、円偏光の方向によるポラリメータの透過率の測定を行った。磁気ヒステリシスの測定のために、ポラリメータに流す電流を -6A から 6A の間で変化させ、それぞれの電流値における偏極分解能 (Analyzing Power) を得た。図 2 にその結果を示している。Current up は電流を -6A から増やしていった測定、down は 6A から減らしていった測定の結果を示している。磁気ヒステリシスの効果により、0A でこれらに大きな違いが見られているが、2A 以上になれば磁化が飽和することが確認できた。この結果から測定では 4A の電流を流して使用することを決定した。また偏極分解能は 6.6 MeV で $1.92 \pm 0.12\%$ と得られた。

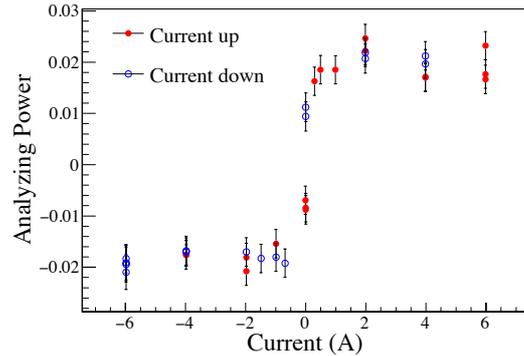


図 2 各電流値における偏極分解能の結果

(2)-② 硫黄-32 の偏極中性子捕獲により生じる円偏光ガンマ線を用いた測定

実際に中性子捕獲反応を測定する、J-PARC MLF の ANNRI において、円偏光の測定が可能であることを実証し、偏極分解能を得る測定を行った。硫黄試料に偏極中性子を照射し放出されたガンマ線をポラリメータを透過させて、HPGe 検出器を用いて検出した。図 3 は得られたガンマ線スペクトル(上図)と、偏極方向による差(下図)を示している。中性子偏極方向により透過ガンマ線数に明らかな差があることが確認された。これが円偏光による効果である。ガンマ線数の差から、偏極分解能は 5.4 MeV で $1.72 \pm 0.23\%$ と得られた。この結果は UVSOR の結果とほとんど整合しているが、UVSOR での測定はガンマ線がポラリメータに垂直に入射した測定であるのに対し、ANNRI での測定は立体角的に広がりを持っている。したがってこの効果により若干の差が見られている。

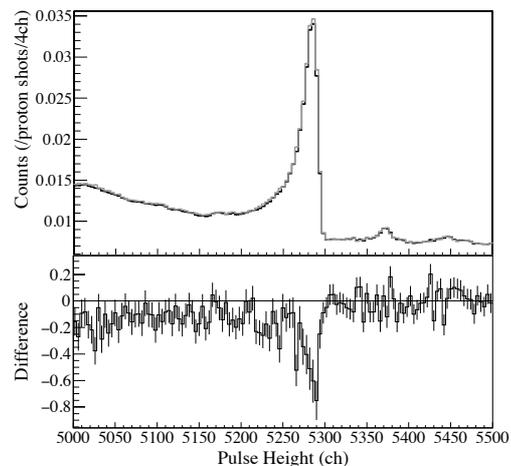


図 3 得られたガンマ線スペクトル(上図)と中性子の偏極方向による差(下図)

以上のように本研究では偏極中性子入射による円偏光度の測定により共鳴のスピンを決定する手法の開発のため、中性子偏極装置の導入とガンマ線ポラリメータの開発をおこなった。世界で初めて J-PARC MLF ANNRI にてパルス中性子源における円偏光ガンマ線の測定に成功した。今後はこの測定を共鳴領域に適用し、共鳴のスピンの測定を実際に行っていく。また円偏光測定は共鳴のスピに限らず、そのほかガンマ遷移上の多数の励起状態のスピンの決定にも利用できる。このような測定に関しても今後取り組んでいく。

<参考文献>

- [1] A. Stolovy, Phys. Rev. 118, 211 (1960).
- [2] K. S. Krane et al., Nucl. Data. Tables 11, 351 (1973).
- [3] L. C. Biedenharn et al., Phys. Rev. 83, 683 (1951).
- [4] G. Trumpy, Nucl. Phys. 2, 664 (1956).
- [5] D. Djadali and J. Elchler, Nucl. Phys. A 165, 560 (1971).
- [6] T. Okudaira et al., Nucl. Inst. Meth. A 977, 164301 (2020).

- [7] R. B. Chesler, Nucl. Inst. Meth. 37, 185 (1965).
- [8] H. A. Tolhoek, Rev. Mod. Phys. 28, 277 (1956).
- [9] M. Katoh et al., J. Phys. Conf. Ser. 2687, 032005 (2024).
- [10] Y. Taira et al., Phys. Rev. A 107, 063503 (2023).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Endo Shunsuke, Kawamura Shiori, Okudaira Takuya, Yoshikawa Hiromoto, Rovira Gerard, Kimura Atsushi, Nakamura Shoji, Iwamoto Osamu, Iwamoto Nobuyuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Measurements of neutron total and capture cross sections of ^{139}La and evaluation of resonance parameters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-023-01203-4	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 Taira Yoshitaka, Endo Shunsuke, Kawamura Shiori, Nambu Taro, Okuizumi Mao, Shizuma Toshiyuki, Omer Mohamed, Zen Heishun, Okano Yasuaki, Kitaguchi Masaaki	4. 巻 107
2. 論文標題 Measurement of the spatial polarization distribution of circularly polarized gamma rays produced by inverse Compton scattering	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.063503	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 遠藤駿典, 奥平琢也	4. 巻 33
2. 論文標題 J-PARC ANNRI ビームラインにおける偏極熱外中性子利用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本中性子科学会誌 波紋	6. 最初と最後の頁 68-72
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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 奥泉舞桜, 奥平琢也, 猪野隆, 遠藤駿典, 奥隆之, 加倉井和久, 河村しほり, 北口雅暁, 木村敦, Clayton Auton, 後藤優, 小林龍珠, 高田秀佐, 高橋慎吾, 清水裕彦
2. 発表標題 J-PARC MLF BL04 ANNRI における偏極中性子利用について
3. 学会等名 日本中性子科学会第23回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Endo, H. Fujioka, I. Ide, M. Inuma, N. Iwamoto, O. Iwamoto, K. Kameda, S. Kawamura, A. Kimura, M. Kitaguchi, R. Kobayashi, S. Nakamura, T. Oku, T. Okudaira, G. Rovira, T. Shima, H. M. Shimizu, S. Takada, S. Takahashi, H. Yoshikawa, T. Yoshioka
2. 発表標題 Circular polarization measurement of γ -rays emitted from $^{32}\text{S}(n, \gamma)^{33}\text{S}$ reaction with polarized neutrons
3. 学会等名 17th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics CGS17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Kawamura, S. Endo, O. Iwamoto, N. Iwamoto, A. Kimura, M. Kitaguchi, S. Nakamura, T. Okudaira, G. Rovira, H.M. Shimizu, T. Shima, H. Yoshikawa
2. 発表標題 Study of the Spin-Memory Effect with low-energy gamma-rays in $^{177}\text{Hf}(n, \gamma)^{178}\text{Hf}$ reaction measurement
3. 学会等名 17th International Symposium on Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics CGS17 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠藤駿典 他
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 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Endo, et al.
2. 発表標題 Current Status for the search of time-reversal symmetry violation using compound nuclear reactions
3. 学会等名 Physics of fundamental Symmetries and Interactions (PSI2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤駿典 他
2. 発表標題 時間反転対称性の破れ探索に向けた中性子入射反応におけるスピン-角相関項の測定
3. 学会等名 The 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠藤駿典
2. 発表標題 中性子捕獲反応により生じるガンマ線の円偏光度測定のためのポラリメータの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022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	奥平 琢也 (Okudaira Takuya) (40826129)	名古屋大学・理学研究科・助教 (13901)	

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