

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14744

研究課題名（和文）ハイパー核ガンマ線分光実験による荷電対称性の破れの研究のための核種同定法の開発

研究課題名（英文）Development of hypernuclear identification method for study of charge symmetry breaking via hypernuclear gamma-ray spectroscopy

研究代表者

山本 剛史 (Yamamoto, Takeshi)

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 先端基礎研究センター・任期付研究員

研究者番号：80784751

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）：新たに導入する(π^- ,K0)反応から中性子過剰鏡像ハイパー核を生成して核種を識別する手法を実現するための検出器デザイン案を作り、モンテカルロシミュレーションによる測定手法の検証及び収量の見積もりを行った。特に検討が必要である 中間子を検出するためのレンジカウンターのデザインを行い、省スペース化を図った上でGe検出器群の内部に設置することを決定した。レンジカウンターの試験機を作成して性能評価を行い、光量や 中間子に対する検出器応答を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発中の実験手法を用いることで、 $A=4$ 以外の中性子過剰鏡像ハイパー核について数ヶ月のデータ収集期間があれば目標とする第一励起エネルギーの10 keV以下の精度での決定が見込まれることが確認できた。この手法の確立は挑戦的ではあるが、これまで実験的にアクセスできなかった多くの核種の研究を可能とし、荷電対称性の研究以外の中性子過剰ハイパー核の研究に繋がる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Preliminary design of detector system was made for new method of hypernuclear identification via the (π^- ,K0) reaction which produce neutron rich mirror hypernuclei. Evaluation of this method and yield estimation was done using Monte-Carlo simulation. Especially, design of range counter is one of important issue for this development. The range counter will be installed inside Ge detector array with small detector design. Light yield and response for π mesons were checked with prototype detectors.

研究分野：物理学

キーワード：ハイパー核

1. 研究開始当初の背景

我々は s クォークを含むハイペロンと核子間の相互作用についての研究を行い、核子-核子間相互作用からバリオン-バリオン間相互作用に拡張した核力の理解を目指している。最も軽いハイペロンである Λ 粒子と核子との相互作用の研究は、 Λ 粒子を原子核に束縛させたハイパー核の構造を調べることで精力的に進められてきた。本研究で着目する荷電対称性は原子核分野では基本的な対称性であり、ハドロンの性質やハドロ間相互作用がアイソスピンの反転に対して不変であるという概念である。通常の原子核構造においては、鏡像核構造の類似性などから荷電対称性が良く成り立っていることが知られている。一方、質量数 $A=4$ のハイパー核の構造には荷電対称性の破れが大きく現れるという実験データが報告されている。鏡像ハイパー核である ^4H と ^4He の基底状態での Λ 粒子の束縛エネルギー (B_Λ) や励起エネルギーの差がどちらも 350 keV 程度と通常の原子核よりも大きい[1]ことが報告されている。ハイパー核構造に大きな荷電対称性の破れが現れることは、これまで広く認められていた Nijmegen グループが提唱する \bar{N} - N 相互作用モデルの知見からは説明できなかった[2]が、近年のハイパー核構造の理論研究では、荷電対称性の破れの大きさが \bar{N} - N 混合の項に敏感であると示唆されており[3,4]、これが \bar{N} - N 相互作用の研究の新たなプローブとなると期待されている。

2. 研究の目的

ハイパー核構造における荷電対称性の破れの大きさから \bar{N} - N 相互作用を研究する上で、励起エネルギー等についての 10 keV 以下のエネルギー精度の良い測定データが重要な役割を果たすと期待される。しかしながら、現状では $A=4$ より重いハイパー核については、特に中性子過剰側の鏡像ハイパー核の 100 keV より良いエネルギー精度の実験データが存在しない。本研究を含む一連の研究では、これら核種における荷電対称性の破れの大きさをガンマ線分光実験によって 10 keV 以下の精度で決定することを目指す。中性子過剰側の鏡像ハイパー核の線分光のためには、荷電交換反応である $p(\pi^-, K^0)$ 反応を新たに導入する必要がある。この反応はハイパー核分光ではまだ採用されたことはないため、本研究では $p(\pi^-, K^0)$ 反応を用いた鏡像ハイパー核のガンマ線分光実験手法の開拓を目指す。この手法の確立は挑戦的ではあるが、これまで実験的にアクセスできなかった多くの核種の研究を可能とする、荷電対称性の研究以外の中性子過剰ハイパー核の研究に繋がる重要な課題である。

3. 研究の方法

J-PARC にて供給可能な 1.1 GeV/c (断面積が大きい運動量領域) の π^- 中間子ビームを標的に照射し、 $p(\pi^-, K^0)$ 反応から鏡像ハイパー核を生成して核種を識別する手法を新たに導入する。この手法では、反応後に生じる K^0 中間子の崩壊粒子である π^+ と π^- 中間子の両方の運動量解析が必要となる。ガンマ線測定のために高分解能の Ge 検出器を標的付近に多数配置するため、 π^+ 及び π^- 中間子の測定用に 4 層を覆うような大型の検出器を採用できない。そこで、 K^0 中間子崩壊から非対称に運動エネルギーが分配されて π^+ と π^- 中間子が放出される事象に着目し、高い運動量 (~ 700 MeV/c) を持つ π^+ 中間子を磁気スペクトロメータで、低い運動量 (~ 150 MeV/c) を持つ π^- 中間子をレンジカウンターでそれぞれ運動量解析して K^0 中間子の運動量ベクトルの再構成を行う手法が実現可能かどうかを、モンテカルロシミュレーションを用いて検討する。また、この実験手法では、先行研究[1]で使用実績のある磁気スペクトロメータと Ge 検出器に加えて、新たにレンジカウンターを導入する必要がある。本研究では、このレンジカウンターのデザインを行った後に、試験機を製作して性能評価を行う。

4. 研究成果

$p(\pi^-, K^0)$ 反応から中性子過剰鏡像ハイパー核を生成して核種を識別するための検出器デザイン案を作り、この測定手法の実現性を検証するために GEANT4 コードを用いたモンテカルロシミュレーションを行った。特に検討が必要である π^- 中間子を検出するためのレンジカウンターのデザインを行い、6~20 mm 厚セグメントのプラスチックシンチレータ層を約 16 層重ねた構成とし、各セグメントを MPPC 読み出しとして省スペース化を図った上で Ge 検出器群の内部に設置することを決定した。図 1 は検出器セットアップを示す。先行研究[1]で使用実績のある Ge 検出器群 Hyperball-J を使用するが、レンジ検出器を設置するために一部 Ge

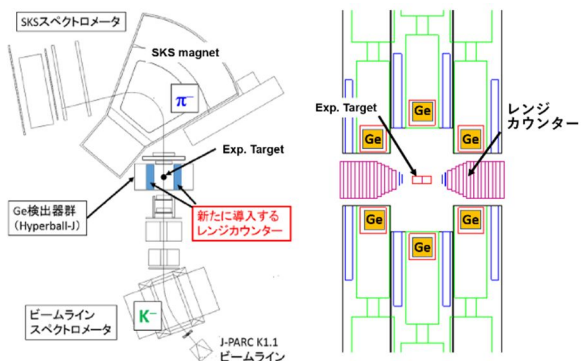


図 1: 検出器セットアップ

検出器の取り外しと位置調整を行ったデザインとする。レンジカウンターは Ge 検出器群の内部の限られたスペースに設置する制約から、長さ ~30cm、高さ ~14cm のサイズのものを標的の側面方向に 2 機設置する。このデザインでは、Ge 検出器の絶対検出効率の低下を 16% に抑えながら、中間子の ~20% をレンジカウンターで飛程測定可能なことが確認できた。この実験手法の提案及びシミュレーション結果は [5] にて報告を行った。また、最初の測定として考えている A=12 の中性子過剰側鏡像ハイパー核である ^{12}B の生成の場合についてガンマ線収量の見積もりを行い、数ヶ月のデータ収集期間があれば目標とする第一励起エネルギーの 10 keV 以下の精度での決定が可能であることが確認できた。

レンジカウンターの開発は東北大学と共同で行った。ガンマ線分光のために十分なハイパー核同定能力を得るために、レンジカウンターの中間子の運動量精度は 20 MeV/c 程度が要請される。この精度に大きく関わるレンジカウンターの層厚さ及び層数については、まずは上記のようにモンテカルロシミュレーションを用いて仮決定した。しかし、シミュレーションでの見積もりが難しいプラスチックシンチレータの発光量(層厚さに依存する)がレンジ測定性能に関わるため、単層の試験機を製作して線源を用いた光量の測定を行い、6mm 厚以上の設定で十分な光量が得られることを確認した。また、レンジ測定性能に影響する“中間子が検出器内で原子核に吸収されることで放出される粒子の挙動”は现阶段でのシミュレーションでは再現が困難であるため、小型で複数層の試験機を製作して、実際に中間子を照射しての試験を行った。図 2 に複数層の試験機の写真及び代表的な中間子照射時の層毎の光量分布を示す。J-PARC ハドロン実験施設の K1.8 ビームラインにて供給される中間子ビームを 100 MeV/c 程度まで減速させてレンジ検出器に照射することで試験を行い、図 2 右の各層の光量分布に示されるような検出器内での停止位置の判別ができる検出器応答が得られることが確認できた [6]。

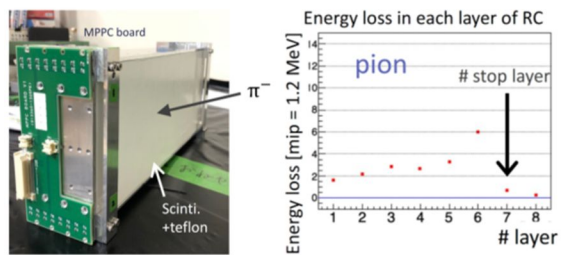


図 2: レンジカウンター試験機の写真(左)と 中間子照射時の各層の光量分布(右)

中間子が検出器内で吸収された後に放出される粒子の効果についての詳細な解析と検証は今後も継続する。

上述の通り、モンテカルロシミュレーションを用いた検出器デザイン及びガンマ線の収量見積もりにより、最初の測定として考えている A=12 の中性子過剰側鏡像ハイパー核である ^{12}B の生成の場合に数ヶ月のビームタイムを要することを確認した。近年、加速器の運転時間に対する制約が厳しくなっており、ビームタイムの短縮化の検討が求められる。本研究を含む一連の研究が目指すガンマ線分光実験においてもこの観点での再検討を行い、Ge 検出器の信号読出しにおける不感時間の短縮により、データ収集の効率化を目指すこととした。先行研究 [1] で採用していた波高保持 ADC 読み出し部を FPGA を用いた汎用回路を利用したシステムを開発することで、データ収集効率を向上させる(1 読出しあたりの不感時間を約 80% 短縮)ことに成功した。また、本研究で目指す測定において、大強度ビーム環境下で Ge 検出器を動作させる際に問題となる、Ge 検出器の前置増幅器のリセット時の信号出力ベースラインの変動を補正するための、信号タイミングの記録を可能とする回路の開発も完了した。どちらも、今後の中性子過剰側鏡像ハイパー核のガンマ線分光実験の提案・遂行に向けた重要な開発要素となった。

< 引用文献 >

[1] T.O. Yamamoto et al., Phys. Rev. Lett. 115, 222501 (2015).
 [2] A. Nogga et al., Phys. Rev. Lett. 88, 172501 (2002).
 [3] A. Gal, Phys. Lett. B 744, 352 (2015).
 [4] D. Gazda and A. Gal, Phys. Rev. Lett. 116 no.12, 122501 (2016).
 [5] T.O. Yamamoto, AIP Conf.Proc. 2130 (2019) 1, 030005.
 [6] 大浦文也, 日本物理学会 2021 秋期大会.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 2件）

1. 著者名 Sakao T., T.O. Yamamoto, et. al.	4. 巻 33
2. 論文標題 Study of Identification Method by the α -p to K_0 Reaction for a α -p Scattering Experiment at J-PARC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 11133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.33.011133	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 T.O. Yamamoto and the J-PARC E63 Collaboration	4. 巻 2130
2. 論文標題 Future gamma-ray spectroscopic experiment (J-PARC E63) on 4LH	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 30005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5118395	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3件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山本剛史
2. 発表標題 X-ray spectroscopy of Xi atom in J-PARC S-2S experiment
3. 学会等名 Program for "5th Symposium on Clustering as a window on the hierarchical structure of quantum systems"
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.O. Yamamoto
2. 発表標題 Recent result and future plan of hypernuclear α -ray spectroscopic experiment at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.O. Yamamoto
2. 発表標題 Gamma-ray spectroscopy of Λ -hypernuclei at the HIHR/K1.1 beamlines
3. 学会等名 International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
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