

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：82118

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20368

研究課題名（和文）原子番号ゼロの中性原子核nn の探索

研究課題名（英文）Search for a neutral nucleus of nnLambda

研究代表者

板橋 浩介（Itabashi, Kosuke）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・量子場計測システム国際拠点・研究員

研究者番号：70966499

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：nn は中性原子核であり、その存否について大変注目を浴びている原子核の一つである。本研究では、先行実験解析によるnn構造の理解と、nn探索実験のデザインを目標とした。先行実験のnn探索実験のデータ解析を通して、直接的な実験データの無いnn相互作用の知見を得ることに成功した。また、nnの微分断面積の上限値の見積もりからnnの存否を明らかにするために必要な収量を算出し、次世代実験のセットアップをデザインした。本研究を通して、nnの構造理解を深め、nnの存否を明らかにするための検討事項を明らかにし、次世代実験立案の土台の構築を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性原子核“nn”の束縛状態は理論的に説明できないにも関わらず、先行研究ではその存在を完全には否定できていない。nnの存否を明らかにすることは、これまでのハイパー核の理論モデルをより発展させる学術的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：The nn is a neutral nucleus, and its existence has garnered significant attention.

This study aimed to understand the structure of nn through the analysis of previous experimental data and to design experiments to search for the nn. Through the analysis of data from the previous nn search experiment, we successfully obtained the information of nn interaction, for which direct experimental data is unavailable. Additionally, by estimating the upper limit of the differential cross-section of nn, we calculated the necessary yield to determine the existence of nn and designed the setup for the next nn search experiment. Through this study, we deepened our understanding of the nn structure, identified considerations necessary for confirming the existence of nn, and established the foundation for planning future experiments.

研究分野：素粒子原子核物理実験

キーワード：nn JLab HRS HKS (e,e'K+)

1. 研究開始当初の背景

$nn\Lambda$ は中性子と Λ のみで構成された原子番号ゼロの中性原子核であり、その存否を確かめることが原子核物理学の大きな課題の一つである。現在主流である Λ ハイパー核の理論モデルでは $nn\Lambda$ の束縛状態は否定されている。しかし、ドイツの重イオン研究所 (GSI) は重イオンビームを用いた実験から $nn\Lambda$ の束縛状態と思われるイベントを観測した。これは現在の理論モデルでは説明できない結果を示唆しており、 $nn\Lambda$ の存否は原子核分野において非常に注目されている。 $nn\Lambda$ の構造を理論モデルで正確に記述できない理由として Λn 相互作用の不確定性があげられる。これまで、バリオン間相互作用は二体散乱実験を通して理解が進んできたが、 Λ 粒子は寿命が短い ($\tau \sim 100$ ps) ために Λn 散乱データは限られている。加えて、中性粒子間 (Λn) の散乱データはないため、荷電対称性の仮定を元に限られた Λp 散乱データから Λn 相互作用は理解されている。しかし近年、少数 (4 体 Λ ハイパー核) 系では ($\Lambda n - \Lambda p$ 間) 荷電対称性が破られていることが明らかとなり、実験的に Λn 相互作用を導出することが急務となる。中性子と Λ のみで構成された $nn\Lambda$ 構造を研究することで純粋な Λn 相互作用の情報を引き出すことができるため、 $nn\Lambda$ の構造解明は強く切望されている。

このような背景から、我々は $nn\Lambda$ の存否を明らかにするために、アメリカの Jefferson Lab (JLab) において $nn\Lambda$ 探索実験を 2018 年に施行した。本実験は ($e, e' K^+$) 反応で $nn\Lambda$ を生成し、 $nn\Lambda$ 質量を高分解能で測定可能である。しかし、本実験では $nn\Lambda$ と思われる事象は観測されたが、統計が不十分であることから $nn\Lambda$ 状態を決定することはできなかった。そこで、本実験ではより高統計での $nn\Lambda$ 観測を可能とする次世代 $nn\Lambda$ 探索実験を立案し、 $nn\Lambda$ の存否を明らかにする。

2. 研究の目的

そのような背景から、私は $nn\Lambda$ 質量の高分解能測定が可能な JLab において、二度目の $nn\Lambda$ 探索実験の立案を本研究の目的とする。そのため本研究では、(i) $nn\Lambda$ の構造 (Λn 相互作用) の理解、および、(ii) 実験セットアップの設計を行った。(i) においては先行実験である JLab の $nn\Lambda$ 探索実験のデータを解析することで $nn\Lambda$ の微分断面積の上限値、 Λn 相互作用の導出を行う。これの解析結果により、 $nn\Lambda$ の存否を明らかにするために必要な収量を見積もることができる。その後、 $nn\Lambda$ イベント事象を十分有意性をもたらすための実験セットアップのデザイン構築を行う。これにより、 $nn\Lambda$ 探索実験の立案に向けた土台を築くことができる。

3. 研究の方法

上記で述べたように、本研究では $nn\Lambda$ 探索実験の立案に向けて、(i) $nn\Lambda$ 構造 (Λn 相互作用) の理解、および、(ii) 実験セットアップの設計を行う。

(i) $nn\Lambda$ の構造理解

$nn\Lambda$ 実験を設計するにあたり、 $nn\Lambda$ の収量を正確に見積もることが極めて重要である。しかし、 $nn\Lambda$ の構造が乏しいことから性格な $nn\Lambda$ の収量を見積もることは困難である。そこで、私は先行実験である JLab の $nn\Lambda$ 探索実験のデータを元に $nn\Lambda$ 収量の見積もりを行った。具体的には $nn\Lambda$ 実験で得た Λ 準自由 (Λ -QF) 分布の構造を、 Λn 相互作用のパラメータを組み込んだモンテカルロシミュレーションと比較することで Λn 相互作用 (ポテンシャルパラメータ) に制約を加えた。 $nn\Lambda$ の微分断面積の上限値は $nn\Lambda$ のポテンシャルモデルに依存しているため、本研究で Λn ポテンシャルモデルを限定することで、 $nn\Lambda$ の収量を制度よく評価することができる。

(ii) 実験セットアップの設計

本実験は $nn\Lambda$ を効率よく収集するために、高分解能スペクトロメーター (HRS) と高分解能 K 中間子スペクトロメーター (HKS) を組み合わせたセットアップを採用した。先行実験では二台の HRS を用いて散乱電子、及び K^+ 中間子の運動量測定を行ったが、 $nn\Lambda$ をより高統計で観測するために、 K^+ 側のスペクトロメーターに東北大学が開発した HKS スペクトロメーターを用いる。HKS は HRS と比べて広い運動量領域を測定することができるため、高統計での $nn\Lambda$ 測定が見込まれる。しかし、HRS-HKS を使った実験は本実験が初となるため、HRS-HKS のシミュレーション空間を構築し、 $nn\Lambda$ の収量を正確に見積もることが必要となる。そこで、本研究では HRS-HKS を組み合わせたシミュレーション空間を構築し、 $nn\Lambda$ 収量評価を行う。

4. 研究成果

まず、先行実験の結果を元に Λn 相互作用の大きさに制約を課し、 $nn\Lambda$ 構造の解明を進めた。これらの研究成果はハイパー核国際会議 (14th international conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, HYP2022) で発表することで国際的な認知を深めることに成功した。これまで直接的なデータが存在しなかった Λn 相互作用に対して初めて制約を課すことに成功し、それらの功績が認められて本会議の proceeding が投稿された。また、これらの実績が認められ ELPH 研究会 C033「ハドロン分光に迫る反応と構造の物理」に招待講演者として本研究成果の報告を行った。

次に nm 次世代実験のセットアップ(HRS-HKS)のシミュレーション空間の構築を行った。東北大学が開発した HKS スペクトロメーターは Geant4 によるシミュレーション空間で構築されている一方、HRS スペクトロメーターは JLab 独自のモンテカルロシミュレーション(SIMC)コードで構築されている。そのため、HRS-HKS セットアップをシミュレーション空間に構築するために HRS の Geant4 シミュレーション空間の構築をした。その結果、 nm の収量およびバックグラウンドレベルの評価をすることができ、次世代 nm 探索実験の立案の土台を築いた。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 K. Itabashi	4. 巻 271
2. 論文標題 Study of n FSI with quasi-free productions on the $3H(e,e'K^+)X$ reaction at JLab	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web Conference	6. 最初と最後の頁 2006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202227102006	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 板橋 浩介
2. 発表標題 $3H(e,e'K^+)X$ 反応における n相互作用の研究
3. 学会等名 ハドロ分光に迫る反応と構造の物理2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Itabashi
2. 発表標題 Study of n FSI with quasi-free productions on the $3H(e,e'K^+)X$ reaction at JLab
3. 学会等名 HYP2022（国際学会）
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
---------------------------	-----------------------	----

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