

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13952

研究課題名（和文）反K中間子原子核測定のための中性子検出能と陽子偏極率測定能を備えた検出器の開発

研究課題名（英文）Development of new scintillation detector towards determination of the spin and parity of the KbarNN

研究代表者

山我 拓巳（Yamaga, Takumi）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：80830306

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、荷電中性のKbarNN状態が崩壊する事象を捕らえるための中性子検出器と、スピン相関測定のための陽子偏極測定器が一体となった検出器の開発を行った。本研究で行った試作機制作とビーム照射実験から、トラッキング層にストローチューブ検出器を用いることとし、検出器の大まかな構成を決定した。また、偽中性子ヒットにより作られる背景事象の効率的な排除を行うためのアルゴリズムを開発した。本手法を既存データに適用することで、KbarNNの崩壊分岐比を求め、結果を論文として報告した。（Physical Review Cに掲載予定。）

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で決定した検出器を用いることで、反K中間子原子核の内部構造を解明するための実験を行う。これにより、中間子を構成要素として持つ新しい原子核状態の謎や、中間子質量の起源のようなハドロン物理の長年の謎の解明に迫ることができると期待される。また、本研究でまとめた論文では、世界で初めてKbarNN束縛状態の中間子崩壊の崩壊分岐比を報告した。中間子崩壊は、(1405)などのハイペロン励起状態の寄与などを調べたり、理論と直接比較することで、KbarNNの内部構造に関する情報を引き出せる重要なチャンネルである。したがって、本研究で得られた結果により今後理論的研究が進展するものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a neutron detector for capturing the decay of charged neutral KbarNN states and a proton polarization detector for measuring spin correlations. Based on the prototype construction and beam irradiation experiments conducted in this study, we decided to use a straw tube detector for the tracking layer and determined the rough configuration of the detector. We also developed an algorithm to efficiently eliminate background events created by false neutron hits. By applying this method to existing data, we obtained the decay branching ratio of KbarNN and reported the results in a paper. (To be published in Physical Review C., already accepted)

研究分野：原子核物理

キーワード：K中間子 原子核 KN相互作用

1. 研究開始当初の背景

反中間子は、クォーク・反クォーク対から成る「メソン」という粒子グループの一種である。通常、メソンは相互作用を媒介するための「仮想粒子」として現れる。メソンが媒介する相互作用の1つが核力であり、原子核を作るための「糊」としてその構成要素である核子同士を結合させている。では、メソン自身が「実粒子」として物質の構成要素になることはあるのだろうか？この疑問は、メソンが発見されてから今日まで長く議論されてきた。非常に単純に考えると、メソンを束縛させるに足る引力があれば、メソンが結合した新しい結合状態が作られるだろう。そのような結合状態を作り得る相互作用として、反 K 中間子(\bar{K})と核子(N)の間に働く $\bar{K}N$ 相互作用が注目された。 $\bar{K}N$ 相互作用は核力と比較しても遥かに強い引力で、反 K 中間子が原子核に束縛された状態「反 K 中間子束縛原子核(\bar{K} 原子核)」が存在することが自然であると考えられた。我々が行った「J-PARC E15 実験」は、 \bar{K} 原子核の中で最も単純な2核子系の状態である $\bar{K}NN$ 束縛状態の生成・観測に世界で初めて成功し、測定した $\bar{K}NN$ 束縛状態の質量から求めた結合エネルギーは40 MeV程度であった。これは同じ2核子系の「通常」原子核である重陽子の結合エネルギー(2 MeV程度)と比べて非常に大きい。さらに状態の空間サイズが極めて小さいことを示唆するデータも得られている。これらの実験結果は従来の原子核描像を大きく変えるほど衝撃的であり、原子核はこれまで実験的に実現し得なかった低温・超高密度状態に初めてアプローチできる系の可能性がある。従って、その存在をさらに決定づける独立な実験事実の提示とスピン・パリティ等の基本的性質の解明が待たれる。

2. 研究の目的

本研究では、我々が発見した $\bar{K}NN$ のより詳細な実験的研究を行うため、測定器および解析手法を開発する。今後行う詳細実験では、i)すでに発見した荷電状態「 K^-pp 」とアイソスピン鏡像関係にある「 \bar{K}^0nn 」の探索、ii) $\bar{K}NN$ の崩壊分岐比の測定、そしてiii) $\bar{K}NN$ のスピン・パリティの決定を行い、 \bar{K} 原子核の基本的性質を明らかにする。i)の探索は、 \bar{K} 原子核の存在を揺るぎない実験事実として確定するための測定である。 $\bar{K}N$ 相互作用は強い相互作用を起源としているため、アイソスピン量子数が極めて良い量子数である。従って我々が発見した「 K^-pp 」が存在するならば、その同位体である「 \bar{K}^0nn 」も必ず存在する。「 \bar{K}^0nn 」を観測するためには、その2体崩壊モードの1つである $\bar{K}^0nn \rightarrow \Lambda n$ を測定する。したがって、測定には中性子検出器が必要となる。ii)の崩壊分岐比の測定は、原子核の内部構造の理解に繋がる。例えば「 K^-pp 」の崩壊は、これまで我々が調べてきた $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ 崩壊モードの他に $K^-pp \rightarrow \pi \Sigma N$ ように中間子を含む崩壊チャンネル(中間子チャンネル)も可能である。中間子チャンネルは $\Lambda(1405)$ 等のハイペロン励起状態と直接結合するので、これらの崩壊分岐比から内部構成にどの程度ハイペロン励起状態が関与しているか調べる。このような中間子チャンネルの多くは崩壊終状態に中性子を含むため、測定には中性子検出器が必要となる。iii)のスピン・パリティ(J^P)の決定は、我々が発見した $\bar{K}NN$ が量子固有状態であることを裏付け、 \bar{K} 原子核の存在をさらに確定するための測定である。 $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ 崩壊で放出される Λp 間のスピン-スピン相関と、「 K^-pp 」と「 \bar{K}^0nn 」の生成比測定の2つの独立な測定により J^P を決定する。「 K^-pp 」の J^P は、中間子(K^-)と2つの陽子(pp)の軌道角運動量が全て0で、陽子スピン同士が逆に組んだ状態($J^P = 0^-$)であると予想されている。 $K^-pp \rightarrow \Lambda p$ 崩壊において、 Λ と p は共に $J^P = 1/2^+$ であるため、崩壊前後のスピン・パリティを保存するためには Λp 間の軌道角運動量が1で、両者のスピンが軌道角運動量を打ち消す向きに揃わなければならない。つまり Λ と p のスピンの向きが揃う。 J^P が異なれば予想される相関係数も異なるため、スピン-スピン相関測定から $\bar{K}NN$ の J^P を決定できる。一方、アイソスピンの結合定数の違いから「 K^-pp 」と「 \bar{K}^0nn 」の生成断面積の比($\sigma_{K^-pp} : \sigma_{\bar{K}^0nn}$)にも J^P の情報が現れる。例えば $J^P = 0^-$ では生成比がおおよそ10:1になることが予想され、 1^- では3:4程度になる。したがって、生成比の測定によりスピン-スピン相関測定とは独立に J^P を決定できる。本測定には中性子検出と陽子のスピン方向を測るためのポラリメータが必要となる。

以上のように、今後行う詳細実験では中性子検出器と陽子ポラリメータが必要となる。そこで本研究ではこれら2つの機能を有する検出器の開発を行い、検出器全体の構成を決定することを目指す。検出器の概念図を図1に示す。大きな立体角を覆うため、検出器は円筒型で実験標的を覆うように置かれる。内側の飛跡検出器の外側に本研究で開発する検出器が置かれる。中性子検出には厚み5cm程度のプラスチックシンチレータ(バルク層)を用いる。このバルク層は陽子偏極測定のための2次散乱標的としても働き、バルク層で

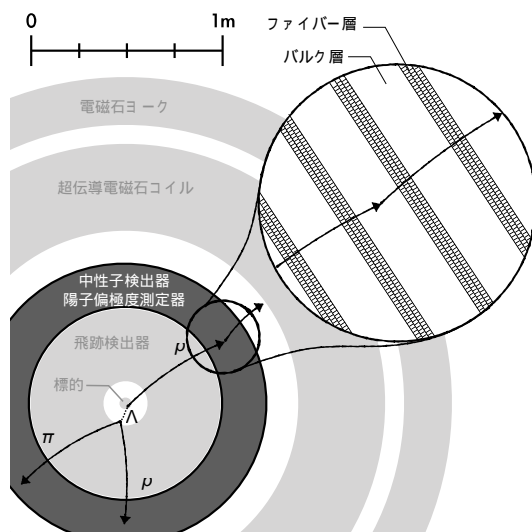


図1. 開発する検出器の概念図

乱した陽子の方向を直後のシンチレーションファイバーを用いた飛跡検出器(ファイバー層)で測定することで陽子の偏極方向を測定する。すべての検出器はソレノイド磁石の中に設置する。

これまでの研究から、この検出器構成で中性子を検出する場合、ソレノイド磁石のコイルなどに荷電粒子が衝突し生成される2次粒子が“偽”の中性子ヒットとして背景事象を作ることが明らかになっている。そこで本研究では、既存データを用いてこの偽中性子ヒットを効率よく排除できる解析アルゴリズムの開発も行う。

3. 研究の方法

図1に示す検出器の構成では、必要な検出器性能を得るために3層のバルク層と6層のファイバー層が必要となる。これでは莫大な製作コストが必要となることが見込まれるため、より簡易な構成で必要性能を実現できるかをシミュレーションなどにより見積もった。また、特にコストが必要となるファイバー層について、薄板シンチレータと波長変換ファイバーを組合せた安価な構成で代替できるかを検証すべく、試作機を開発しビーム照射試験を行った。

中性子検出事象に含まれる大量の“偽”中性子ヒットによる背景事象を排除するための解析アルゴリズムの開発は、J-PARC E15 実験で取得した既存データを用いて行った。J-PARC E15 実験でも円筒型検出器を使用しており、新しく開発する円筒型検出器と同じ直径の飛跡検出器(CDS)と、その外側に厚さ3cmのプラスチックシンチレータで作られた荷電粒子検出器(CDH)が設置されている。本研究ではCDHにより中性子を検出した事象を選び、偽中性子ヒットによる背景事象の排除を試みた。

4. 研究成果

初めに薄板シンチレータと波長変換ファイバーを組合せた試作機開発について述べる。図2に試作した検出器の概略図を示す。薄板シンチレータに掘った溝に波長変換ファイバーを埋め込んだ構造を持つ。波長変換ファイバーの間隔は5mmとした。シを通過した荷電粒子による発光を波長変換ファイバーの両端に接続したMPPCにより読み出し粒子を検出する。ファイバー層の代わりとして用いるためには、薄板シンチレータ上の2次元位置情報を得なければならない。そこで、シンチレータの長辺方向は左右のMPPCの時間差を、短辺方向は隣り合うファイバー間のADCの加重平均をそれぞれ用いて通過位置を測る。したがって、長辺方向の位置分解能は時間分解能で決まるため素直であるが、短辺方向はシンチレータの厚みや波長変換ファイバーの間隔などの条件に依存し複雑である。

図3にビーム照射試験で得られたADCスペクトルを示す。実験ではシンチレータの短辺幅より十分広がったビームを長辺の中心付近に照射した。特定の位置に照射した時の応答の変化を見るために、シンチレータの中心にトリガー検出器を置き、トリガー検出器にヒットが有る場合と無い場合を比較した。図のADCスペクトルはトリガー検出器に最も近い波長変換ファイバーに接続した左右のMPPCのADCの相乗平均のスペクトルで有る。図から分かる通り、トリガー検出器の有無でADCスペクトルの重心に有意の差が無いため、短辺方向の位置分解能は残念ながら得られていなかった。そのため、このような検出器構成でファイバー層を代替することはできないという結果となった。

以上の結果を踏まえ、シンチレーションファイバーの代わりになる飛跡検出器を模索し、COMPAS 実験などで用いられているストローチューブ検出器を用いることを検討した。そこで、Stefan Mayer Institute (オーストリア)の研究者らと検討を重ね、おおよその検出器構成を決定した。

次に、偽中性子ヒット事象を排除するためのアルゴリズム開発について述べる。偽中性子ヒットは、ビームによって生じた2次粒子(中性電荷)がソレノイド磁石などの物質に衝突し生じる3次粒子(荷電)によって作られる。したがって、偽中性子ヒットの検出タイミングはランダム性が大きい。しかしある程度ビームや実際に検出された荷電粒子の検出タイミングと同調はしており、完全なランダムノイズとしては取り扱うことができない。そこで、偽中性子ヒットにより作られる分布を擬似的に作るため、イベントミクシングという手法を用いた。これは、あるトリガーで得られたヒット情報と別なトリガーで得られたヒット情報を組み合わせることで、偽のヒット情報を作出すものである。この手法が有効であるかを検証するため、J-PARC E15 実験で得られたデータを解析した。

解析では、 $K^- + ^3\text{He} \rightarrow \pi Y NN$ という中間子が生じる終状態チャンネルに着目した。ここでY

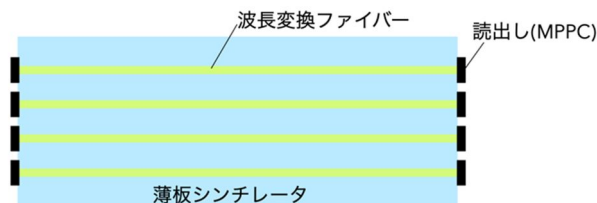


図 3 試作機の概略図

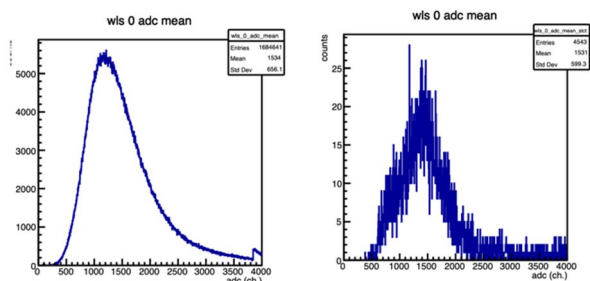


図 2.ビーム照射時の ADC スペクトル。左図は全領域にビーム照射した場合。右図はシンチレータ中心にビームが当たった事象のみを選択。

は Λ もしくは Σ 、 N は p もしくは n である。例えば、 $\pi^+\Lambda nn$ という終状態チャンネルの場合、2つの中性子が生じる。解析では、 π^+ と $\Lambda \rightarrow \pi^- p$ を検出し、さらに1つの中性子が検出された事象を選ぶ。検出されていないもう1つの中性子は欠損質量法により中性子であることを同定する。

図4に解析で得られた欠損質量分布を示す。左図は背景事象を含んだすべてのイベント分布を示している。ここで見える2つのピークはそれぞれ未検出粒子中性子もしくは Λ であったイベントで、これらは中性子を正しく検出できた事象である。図から、これらのピークの下になだらかな分布があることが分かる。このなだらかな分布が偽中性子ヒットにより作られたものである。イベントミクシング法により見積もった背景事象分布が左図中の灰色線である。図から分かる通り、イベントミクシング法により見積もった背景事象分布が、実データに含まれる偽中性子ヒットによる分布をよく再現している。実際、右図は背景事象を排除した後の欠損質量分布で、なだらかな分布が排除され、2つのピークのみが残っている。

本解析手法を用いて行った、 $\pi^- \Lambda pp$ および $\pi^+ \Lambda nn$ 終状態の事象選別の様子を図5に示す。 $\pi^- \Lambda pp$ は荷電粒子のみを検出すれば良いため、偽中性子ヒットによる背景事象は存在しない。図から分かる通り、 $\pi^+ \Lambda nn$ 事象選別も同程度のS/Nで行うことができた。したがって本手法を用いることで、新たに開発する検出器でも偽中性子ヒットによる背景事象を効率良く排除できると期待できる。

図6に、本解析手法で中間子を終状態にもつチャンネルを解析し得られた不変質量

分布を示す。解析では $\pi^+ \Lambda nn$ の他に、 $\pi^+ \Sigma^+ pn$ チャンネルも同様にして中性子ヒットを選び事象選別を行っている。図から分かる通り、 $\bar{K}NN$ 質量閾値(図中青破線)よりも低湿両側にもイベントがある。これら中間子を終状態に持つチャンネルについて $\bar{K}NN$ とquasi-freeと呼ばれるプロセスを仮定しスペクトルの成分分解を行うことで、世界で初めて $\bar{K}NN$ の中間子崩壊の崩壊分岐比を報告した。(Physical Review Cに掲載予定; [arXiv:2404.01773](https://arxiv.org/abs/2404.01773))

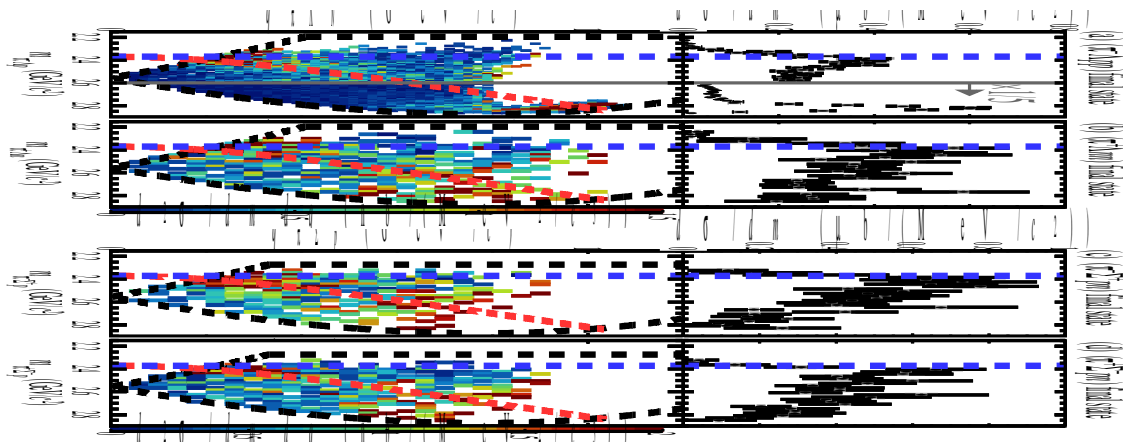


図6. 中間子を含む終状態を解析して得られた不変質量分布。(b-d)が中性子ヒットを含む終状態チャンネル。

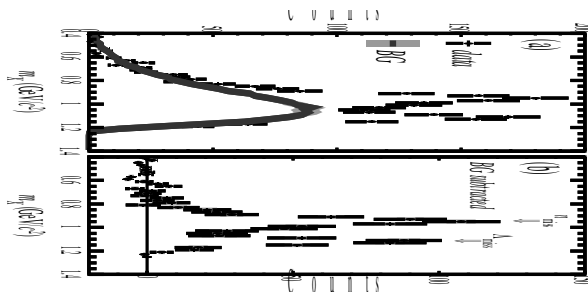


図4. 偽中性子ヒット事象の排除前後の比較。(a)の灰色線で示す分布が本研究で開発した手法によって見積もった背景事象。

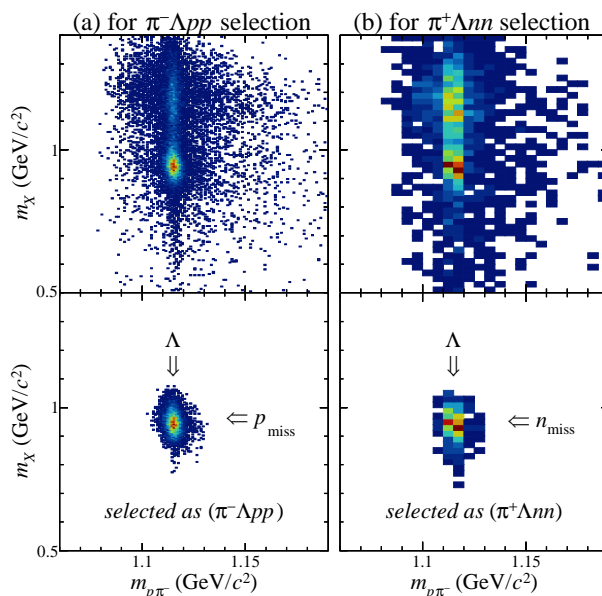


図5. 中間子を含む終状態の事象選択。(a)と(b)はそれぞれ、中性子ヒットを含まない、含むチャンネルの解析。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山我拓巳 他J-PARC E15 collaboration
2. 発表標題 KNN YN崩壊事象の探索
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山我拓巳 他J-PARC E15 collaboration
2. 発表標題 Experimental investigation of KNN state using K + 3He reaction at J-PARC
3. 学会等名 EMMI workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山我拓巳 他J-PARC E15 collaboration
2. 発表標題 Mesonic decay of KNN and future project
3. 学会等名 J-PARC Hadron workshop
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

掲載決定済みの論文一報 (Physical Review C),
T. Yamaga et al, "Measurement of the mesonic decay branch of the $K\bar{a}rNN$ quasi-bound state", to be published in Phys. Rev. C

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