

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04006

研究課題名(和文) K中間子原子核K-ppのアイソスピンパートナー、K-pn探索

研究課題名(英文) Search for the K-pn bound state, the isospin partner of the K-pn

研究代表者

佐久間 史典 (Sakuma, Fuminori)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員

研究者番号：10455347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、反K中間子と核子2個が束縛した反K中間子原子核 $\bar{K}pp$ 束縛状態のうち、我々J-PARC E15実験で発見したK-pp束縛状態のアイソスピン・パートナーであるK-pn束縛状態を探索し、反K中間子原子核の構造を明らかにすることを目的とする。K-pn束縛状態の n 崩壊検出を目指し、プラスチック・シンチレーターとMPPCアレイを用いた汎用性の高い中性子検出器の開発を進めた。50x50x750mmのシンチレーターと25mm角4x4-MPPCアレイを用いた試作機を製作し、50ps程度の高時間分解能を達成できることを確認した。本研究により次世代実験に用いる中性子検出器としての技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

反K中間子が原子核に束縛した反K中間子原子核は、中性子星内部などで実現されているような、高密度でコンパクトな状態である可能性が示唆されている。その反K中間子原子核の内部構造等に関する知見を得るためには、本研究のようなアイソスピンの異なる状態を含めた包括的かつ系統的な調査が重要であり、その崩壊で出てくる中性子の検出が肝となる。本研究では、この目的のために、MPPCアレイと小型プリアンプが一体型となった小型読み出し回路を用いた中性子検出器を開発した。これにより、検出器の形状に自由度が高く使用環境を選ばない、様々な実験において汎用性の高い安価で高時間分解能な中性子検出器を可能とした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to elucidate the structure of anti-kaon and nuclear bound states through exploring the K-pn bound state, which is the isospin partner of the K-pp bound state that we observed in the J-PARC E15 experiment. In order to detect n decay of the K-pn bound state, we developed a highly versatile neutron detector using a plastic scintillator and an MPPC array. We fabricated a prototype using a 50x50x750mm scintillator and a 25mm square 4x4 MPPC array, and confirmed that it can achieve high time resolution of about 50ps. This study established the technology for a neutron detector to be used in the next-generation experiment.

研究分野：ハドロン物理学実験

キーワード：反K中間子原子核 量子色力学(QCD) $\bar{K}pp$ $\bar{K}pp$ 大型ソレノイド検出器 中性子検出器 MPPC プラスチック・シンチレーター

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

反 K 中間子原子核は反 K 中間子と原子核の強い束縛状態であり、強い引力であると知られる $\bar{K}N$ 相互作用の帰結としてその存在が理論的に予想されている[1]。このような反 K 中間子原子核が存在すると、原子核密度の数倍にも及ぶ非常に密度の高い状態になっているとの理論予想もあり、高密度物質の謎に実験室レベルで迫れる可能性がある。反 K 中間子原子核探索実験は世界各地で行われており、“反 K 中間子と核子 2 つが深く束縛した $\bar{K}NN$ 束縛状態”の存在を示唆する結果が報告されている一方[2-4]、それらの結果を支持しない実験結果の報告もあり[5-7]、 $\bar{K}NN$ 束縛状態の存否は謎であった。

そのような状況において、近年我々は $K+^3\text{He}\rightarrow\Lambda p+n$ 反応を用いた J-PARC E15 実験において、 $\bar{K}NN$ 束縛状態のアイソスピン+1/2 状態である K-pp 束縛状態を探索する実験を行い、ついにその存在を明らかにした[8,9]。1 GeV/c の K-中間子を ^3He 標的に当てて中性子をたたき出し($^3\text{He}(K^-, n)$ 反応)、反跳した仮想反 K 中間子を残り 2 つの核子に吸収させて直接 K-pp 束縛状態を作り出すという、反応から生ずる不定性の少ない全く新しい手法を用いた実験である。

$\Lambda p n$ 終状態を排他的に調べた結果、 Λp 不変質量分布において、反 K 中間子と陽子 2 つの質量 $M(Kpp)$ より小さく、かつ $^3\text{He}(K^-, n)$ 反応の運動量移行量 q の小さな位置に、質量分布中心が q に依存しない束縛状態「反 K 中間子原子核 K-pp」のシグナルを発見した [8,9]。図 1 は得られた Λp 不変質量分布のうち、シグナルの分離が良い運動量移行量 q が 0.35-0.65 GeV/c のイベントを選んだものを示す。得られた K-pp 束縛状態は束縛エネルギー ~ 50 MeV、崩壊幅 ~ 100 MeV を持つ。この実験的に得た不変質量分布は、理論的に予想される K-pp 束縛状態を取り入れた反応モデルにより良く再現され、観測された構造が K-pp 束縛状態由来であることが支持されている[10]。また、運動量移行を考慮した S 波の平面波インパルス近似(PWIA)を用いた解析と合わせると、この K-pp 束縛状態は、コンパクトで高密度な状態である可能性があることが分かった。

しかしながら、K-pp 束縛状態の全容は未だ実験的に明らかにされたとは言い難い。すなわち、状態の内部量子数であるスピン・パリティの決定、 Λp 崩壊以外の崩壊モードの調査、アイソスピン状態の異なる状態 (アイソスピン・パートナー) の確立、それらに基づく内部構造の解明、等々明らかにすべき事柄は多い。今後の研究では、このような課題をひとつずつ明らかにしていき、さらには、構成核子数を変化させた系統的調査により、「反 K 中間子原子核は本当に通常原子核密度を超えるような密度になっているのか?」「そのような高密度下では中間子の性質(質量・相互作用)がどのように変化しているのか?」などの基本的な問いに答える必要がある。このような研究は、原子核物理に留まらず、「ハドロン質量の起源」「中性子星内部級の超高密度状態」等、自然現象の理解に残る根源的な問いの解明に挑むものである。

2. 研究の目的

本研究では、反 K 中間子と核子 2 個が束縛した反 K 中間子原子核 $\bar{K}NN$ 束縛状態のうち、我々 J-PARC E15 実験で発見した K-pp 束縛状態のアイソスピン・パートナーである K-pn 束縛状態を探索し、反 K 中間子原子核の構造を明らかにすることを目的とする。K-pn 束縛状態は Λn 対へ崩壊すると予想されるため、中性子を効率よく検出することが実験の肝となる。よって、空間的制約が厳しい場所にも中性子検出器を設置して、大立体角をカバーした中性子検出を行うことが重要である。この目的のため、次世代の実験に向けた、プラスチック・シンチレータとシリコン受光素子の一種である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)を用いた汎用性の高い中性子検出器の開発を目指した。

3. 研究の方法

次世代実験として我々はその準備を行っている E80 実験では、反 K 中間子原子核を系統的かつ詳細に調べることを目的とする。新しく建設中の円筒形検出器群(CDS)は、0.7T のソレノイド磁場を広い領域で供給する超伝導ソレノイド磁石、荷電粒子の運動量を再構築する円筒形ド

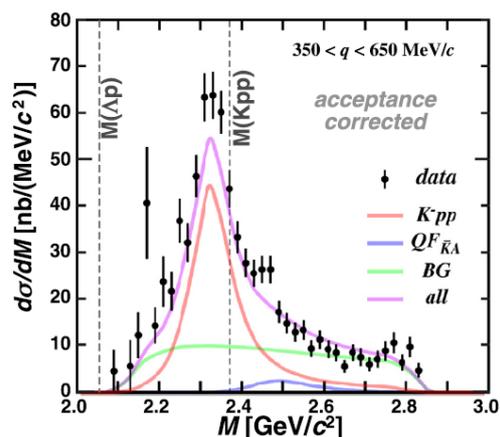


図 1: 検出効率を補正した Λp 不変質量分布。K-pp が K 中間子原子核のシグナル。 QF_{KA} は K-中間子の非共鳴 2 核子吸収(QF 反応)、BG はその他のバックグラウンドを表す。 $M(Kpp)$ は K 中間子が束縛状態を作る際の質量閾値(構成要素の質量和)で、低い側が束縛領域を表す。

リフト・チェンバー(CDC)、及び、荷電粒子数トリガー/TOF 検出器/中性子検出器として用いる円筒形中性子検出器(NC、2本の1.5インチ高磁場耐性PMTで読み出す2500×100×50mm³程度のプラスチック・シンチレーターアレイ)から主に構成される(図2) [11,12]。CDS 中心部に置かれる標的から飛来する粒子に対して、NCの最内層部で93%の大立体角を有するスペクトロメーターであるが、バックグラウンド抑制のために、前後方の非常に狭いスペースにも中性子検出器を導入するのが望ましい。本研究では、このような磁場中、かつ、検出器形状の自由度が低い条件においても用いることの出来る汎用性の高い中性子検出器を開発すべく、プラスチック・シンチレーターとMPPCアレイを用いた中性子検出器の開発を進めた。

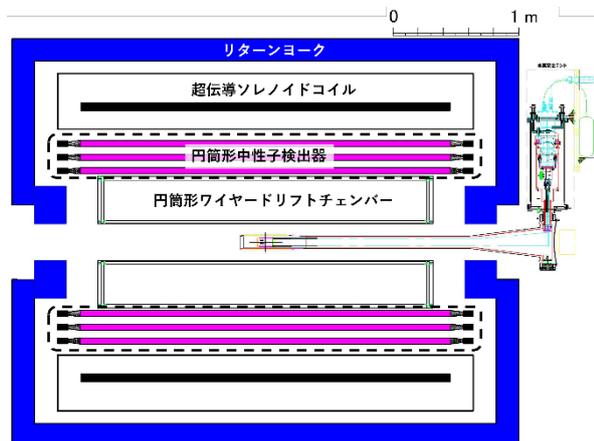


図 2 : 新しく建設中の
Cylindrical Detector System (CDS)

4. 研究成果

MPPCアレイとして25mm角4x4-MPPCアレイ(浜松 S13361-6050AE-04)を用いることにより、NCで用いる1.5インチ光電子増倍管と同等の受光面積を確保することを可能とした。また、光電子増倍管と同様に受光面積を1チャンネルで読み出せるよう、16個の素子を直列・並列接続のハイブリッド接続 [13]でつなげて1チャンネルで読み出すこととした。読み出したシグナルは、2段のRFアンプ(電圧増幅)とポールゼロキャンセレーション回路を用いたこれまで実績のある増幅回路を用いて増幅を行い、後段のADC/TDCへ伝送する。これらMPPC・接続回路・増幅回路を、光電子増倍管を置き換える形で設置できるように、図3に示す一体化したモジュール基板を開発した。

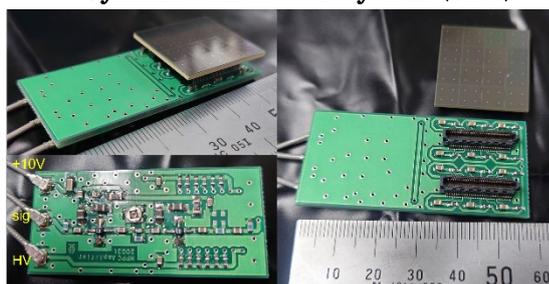


図 3 : 開発した MPPC・接続回路・増幅回路の一体モジュール。



図 4 : 中性子検出器試作機。

5x5x75cmのシンチレーターの両端にこのMPPCモジュールを装着した中性子検出器試作機を製作し(図4)、2023年1月に、東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームを用いてその性能試験を行った。得たデータ解析の結果、この中性子検出器試作機は50ps程度の高時間分解能を達成していることを確認した。得られた時間分解能は、NCへの要求性能100ps程度に比べても優れており、中性子検出器として十分な性能である。

したがって、本研究により、次世代実験に用いるMPPCアレイを用いた中性子検出器の基礎技術が確立された。これにより、検出器の形状に自由度が高く使用環境を選ばない、様々な実験において汎用性の高い、安価で高時間分解能を有する中性子検出器が実現された。

<引用文献>

- ① Y. Akaishi and T. Yamazaki Phys. Rev. C65 (2002) 044005. 等
- ② M. Agnello et al. Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 212303.
- ③ T. Yamazaki et al. Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 132502.
- ④ Y. Ichikawa et al. Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 021D01.
- ⑤ G. Agakishiev et al. Phys. Lett. B742 (2015) 242.
- ⑥ A. O. Tokiyasu et al. Phys. Lett. B728 (2014) 616.
- ⑦ R. Del Grande et al. Eur. Phys. J. C79 (2019) 190.
- ⑧ S. Ajimura et al. Phys. Lett. B789 (2019) 620.
- ⑨ T. Yamaga et al. Phys. Rev. C 102 (2020) 044002.
- ⑩ T. Sekihara, E. Oset, and A. Ramos Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 (2016) 123D03.
- ⑪ J-PARC E80 Proposal, http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_2007/pdf/P80_2020-10.pdf.
- ⑫ J-PARC E80 TDR, http://ag.riken.jp/J-PARC/PAC/E80_TDR_20220603_submitted.pdf.
- ⑬ K. Ieki et al. Nucl. Instr. and Meth. A 925 (2019) 148.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 F. Sakuma et al.	4. 巻 62
2. 論文標題 Recent Results and Future Prospects of Kaonic Nuclei at J-PARC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00601-021-01692-3	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 該当する

1. 著者名 T. Yamaga et al.	4. 巻 102
2. 論文標題 Observation of a KbarNN bound state in the He3(K-, p)n reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 44002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.102.044002	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 該当する

1. 著者名 F. Sakuma et al.	4. 巻 262
2. 論文標題 Summary of the K^-pp bound-state observation in E15 and future prospects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01008 ~ 01008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202226201008	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5件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Fuminori Sakuma
2. 発表標題 Summary of the K-pp bound-state observation in E15 and future prospects
3. 学会等名 INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXOTIC ATOMS AND RELATED TOPICS (EXA 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fuminori Sakuma
2. 発表標題 Light kaonic nuclei at J-PARC
3. 学会等名 Strangeness Nuclear Physics Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐久間 史典
2. 発表標題 軽いK中間子原子核の系統的測定
3. 学会等名 日本物理学会・第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fuminori Sakuma
2. 発表標題 Recent results and future prospects of kaonic nuclei at J-PARC
3. 学会等名 Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 程田英斗
2. 発表標題 J-PARCにおける K中間子原子核実験のための 円筒型中性子検出器の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

J-PARC E15/E80 experiment website
http://ag.riken.jp/J-PARC/
Sakuma's website
http://ag.riken.jp/J-PARC/sakuma/

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			
イタリア	INFN-LNF			
オーストリア	SMI			