

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800149

研究課題名(和文) K中間子入射反応の精密理論解析によるハイペロン分光とYY間相互作用の研究

研究課題名(英文) Study of hyperon mass spectra and YY interactions through precise analyses of antikaon-induced reactions

研究代表者

鎌野 寛之 (Kamano, Hiroyuki)

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・博士研究員

研究者番号：00625361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：陽子や中性子の仲間であるハイペロンは、中性子星やハイパー核の謎を解く鍵になると予想され、その存在や質量を確定することは喫緊の課題である。本研究では、二体、三体系のチャンネル結合の効果を厳密に取り扱う反応理論に基づき、反K中間子を陽子や重陽子に入射させて様々な中間子を生成する反応の包括的な部分波解析を世界で初めて行った。反応の中間過程に生成されるハイペロンとその共鳴状態を探索し、その質量スペクトルを決定するとともに、これまで未発見の新しいハイペロン共鳴の存在を指摘した。また、直接測定することが難しいハイペロン間相互作用を反K中間子-重陽子反応を介して精密に決定する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Establishing the existence and mass spectrum of hyperons is an urgent task in relation to the study of various systems such as neutron stars and hyper nuclei. In this study, we have developed a theoretical model for antikaon-proton and antikaon-deuteron reactions, which rigorously treats coupled-channel effects coming from two-body as well as three-body reaction channels. We then have accomplished a comprehensive partial-wave analysis of existing data for antikaon-induced reactions. Through this analysis, we have successfully determined the mass spectrum of hyperons and discovered new hyperon resonance states. Also, we have developed a theoretical approach that enables a quantitative and accurate determination of hyperon-hyperon interactions through antikaon-deuteron reaction data.

研究分野：ハドロン物理

 キーワード：ハイペロン 共鳴状態 パリオン間相互作用 チャンネル結合 ストレンジネス 部分波解析 ハドロ
ン分光 K中間子

1. 研究開始当初の背景

(1) K 中間子原子核やハイパー核の物理との深い関連から、ストレンジネス量子数をもつバリオンであるハイペロンの性質(質量スペクトル、相互作用、生成メカニズム等)の理解が急務となっている。例えば、理論的に存在が予言されているストレンジダイバリオン(K 中間子 1 個と核子 2 個の準束縛状態)の個数や束縛エネルギーに対して、 Λ バリオンの第一励起状態である $\Lambda(1405)$ の性質が強く影響することが示唆されている[引用文献①]。しかしながら、実験データの不足などから $\Lambda(1405)$ の性質については未だよく分かっていない。実際、半数以上のハイペロン励起状態(Y^*)については、現状では存在すら確定していない。この状況を打開するため、日本の大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、二次粒子ビームである π 中間子や反 K 中間子を利用することで、 $\Lambda(1405)$ をはじめとする Y^* やバリオン間相互作用の解明を目指す実験が推進・計画されている。

(2) ハドロン励起状態は、散乱の連続状態(反応チャンネル)に結合して瞬時に崩壊する不安定な粒子(共鳴状態)である。ところが、ハドロン励起状態に対する従来の理論研究の多くは励起状態を崩壊しない安定粒子として取り扱い、崩壊の物理が励起状態の性質に与える影響についてはほとんど調べられてこなかった。反応ダイナミクスを適切に取り入れた理論的手法に基づき、ハドロン励起状態の性質を「崩壊する不安定な共鳴状態」という観点から新たに検証することが、ハドロン物理における最重要課題のひとつとして強く認識されている。

2. 研究の目的

(1) 現存する K^- -陽子(p)反応データの包括的な部分波解析を通じ、ストレンジネス $S=-1$ をもつ $Y^*(=\Lambda^*, \Sigma^*)$ バリオンの質量スペクトルや崩壊分岐比等を決定する。質量スペクトルの研究を介して未発見の Y^* の探索を行うとともに、 Y^* 質量スペクトルの確立に向けてさらに必要となる観測量データの種類・精度・運動学的領域等を評価し、新しい実験を提案する。

(2) K^+p 反応では直接アクセスすることが難しい $\Lambda(1405)$ などの低励起 Y^* 共鳴の質量スペクトルを決定するために、 K^- -重陽子(d)反応、 $K^-d \rightarrow \pi YN$ 、の理論的評価を行う。低励起 Y^* 共鳴が、J-PARC E31 実験で測定される当該反応の観測量に与える影響の大きさを検証する。

(3) K^-d 反応を利用することで、理論・実験双方において謎の多いストレンジネス $S=-2$ セクターのバリオン間相互作用の評価が可能である。本研究では、 $K^-d \rightarrow K^0(BB)_{S=-2}$ 反応を利用した YY 間相互作用の精密決定の可能性

を検証し、将来の J-PARC 実験への提案を行う。

3. 研究の方法

(1) K^+p 反応データの理論解析に必要なハドロン反応模型と、その反応模型を実装した数値解析コードを開発する。二体、三体チャンネル結合系のユニタリー性を厳密に満たす「動的チャンネル結合模型[引用文献②]」を反応模型開発の出発点にすることで、共鳴状態の質量の起源や生成メカニズムの理解に欠かせない、多チャンネル反応ダイナミクスの微視的過程の記述を可能にする。実験データの χ^2 フィットにより模型のパラメータを決定する。 χ^2 フィットにより得られた模型パラメータを用い、反応模型から散乱振幅や Y^* 共鳴に関する情報を得る。

(2) K^-d 反応を解析するための土台となる反応模型については、図1のような過程を考慮したものを構築する。ここで、メソン-バリオンの二体部分系(図1斜線部)については、 K^-p 反応データの解析で構築された反応模型で得られた散乱振幅を用いる。一方、重陽子波動関数やバリオン間相互作用については、既存の realistic な反応模型で得られたものを研究目的に応じて適当に選ぶ。

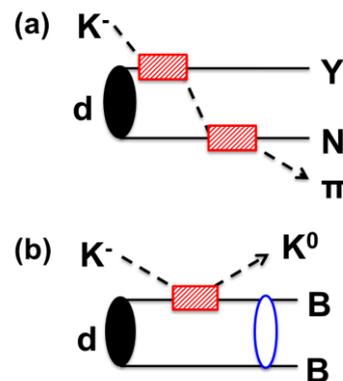


図1 : (a) $K^-d \rightarrow \pi YN$ 反応 (b) $K^-d \rightarrow K^0 BB$ 反応

4. 研究成果

(1) ストレンジネス $S=-1$ セクターのメソン-バリオン反応を記述する「動的チャンネル結合模型」を用い、 $K^+p \rightarrow \bar{K}N, \pi\Sigma, \pi\Lambda, \eta\Lambda, K\Xi$ 反応の包括的な部分波解析を世界で初めて行った(図2)。解析は現存する全ての非偏極断面面積およびスピン偏極量のデータの χ^2 フィットにより行われ、解析に含められたデータ点は 17,000 個以上にのぼる。この解析を通じ、ハドロン物理において重要な $S=-1$ セクターのメソン-バリオン間相互作用に関する基本情報(散乱長、散乱の部分波振幅等)を抽出した。一方、実験データ量が少ない終状態バリオンのスピン偏極 P や、現時点ではデータが皆無であるスピン回転角 β 等の観測量の情報が、抽出された散乱振幅

の不定性を取り除くのに不可欠であることを定量的に示し、J-PARC をはじめとするハドロン実験施設での新しい実験の重要性を示した。この成果は Physical Review C 誌に発表され、Editors' Suggestion に選定された。

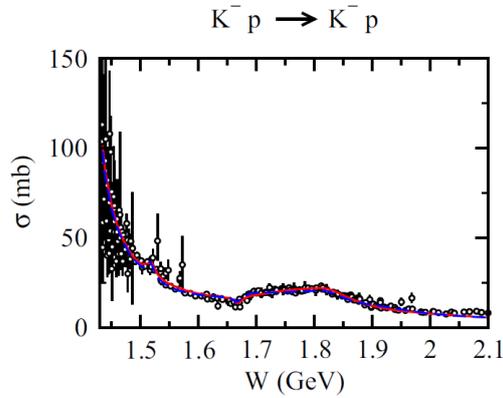


図2： χ^2 フィットの一例(K-p \rightarrow K-p 反応全断面積)。(赤線)Model A、(青線)Model B。

(2) 上記(1)の部分波解析を通じて得られた様々な K-p 反応の散乱振幅を複素エネルギー平面へ解析接続することにより、散乱振幅の極として定義される Y^* の質量、崩壊幅等に関する情報を抽出した(図3)。これまで未発見だった新しい Y^* の存在を予言するとともに、これらの新しい共鳴がどのような観測量に強い影響を与えるかを明らかにし、その存在の決定に最適な新しい反応実験を提案した。本研究を通じて得られた Y^* 共鳴極に関する一連の情報は、Particle Data Group (PDG) が編集する Review of Particle Physics の次回更新時に掲載される予定である。

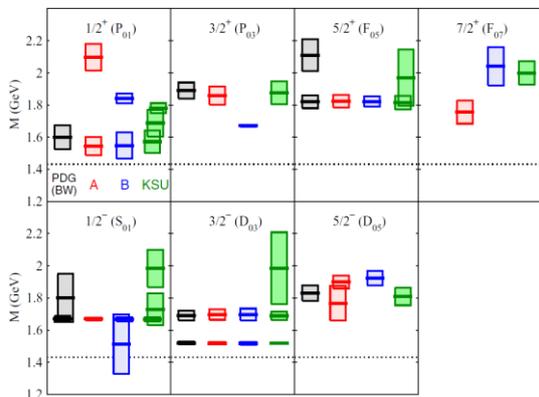


図3： Λ バリオンの質量スペクトルの比較。(黒)ブライト-ウィグナー質量(PDG)、(赤)Model A(本研究)、(青)Model B(本研究)、(緑)Kent State 大グループの結果[引用文献③]

(3) K-d \rightarrow π YN 反応の理論計算を行い、低励起 Y^* 共鳴が当該反応の観測量に与える影響を検証した。計算に必要なメソン-バリオンの二体部分系の素過程の振幅については、K-p 反応データでよくテストされたもの[上記成果(1)]を用いることにより、信頼性の高い K-d \rightarrow π YN 反応モデルの構築に成功した。J-PARC E31 実験で測定される当該反応のデータが、 $\Lambda(1405)$ をはじめとするいくつかの低励起 Y^* 共鳴の質量の決定に非常に有益な情報を与えることを定量的に示した(図4)。

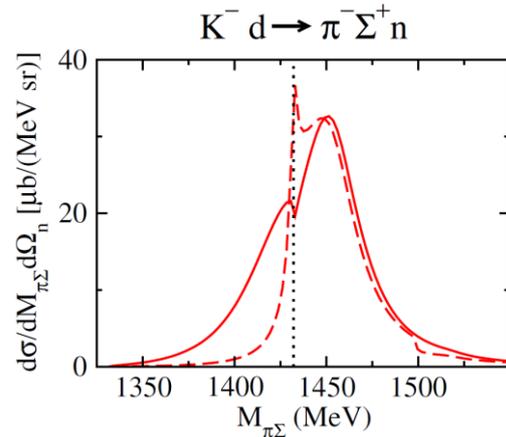


図4：入射 K 運動量 1GeV、中性子散乱角 0 度における K-d \rightarrow $\pi^- \Sigma^+ n$ 反応 3 重微分断面積。横軸は終状態 $\pi^- \Sigma^+$ の不変質量。(実線)フルの計算結果、(点線) $\Lambda(1405)$ を含む S 波 Λ 共鳴の寄与をオフにした計算結果。

(4) ストレンジネス $S=-2$ セクターのバリオン間相互作用を調べるのに適した反応として K-d \rightarrow K⁰(BB)_{S=-2} 反応に着目し、当該反応を記述するモデルを構築した。構築したモデルを用いて $S=-2$ のバリオン間相互作用や H ダイバリオンの有無が反応の観測量に与える影響を検証した。反応の運動学的領域(入射エネ

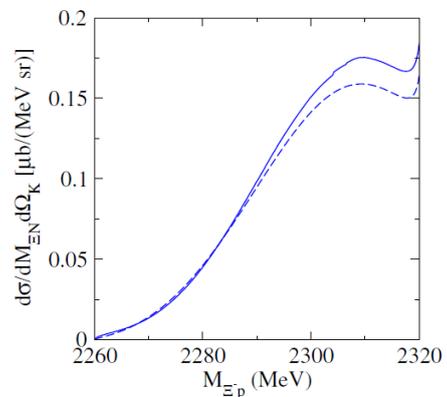


図5：入射 K 運動量 1GeV、K0 中間子散乱角 0 度における K-d \rightarrow K⁰ $\Xi^- p$ 反応 3 重微分断面積。横軸は終状態 $\Xi^- p$ の不変質量。(実線)フルの計算結果、(点線) $\Xi^- p$ 間終状態相互作用をオフにした計算結果。

ルギー、散乱角等)をうまく選ぶことにより、バリオン間相互作用に起因する終状態相互作用の効果が観測量に有意な影響を与えることを示した(図5)。

<引用文献>

- ① Y. Ikeda, H. Kamano, T. Sato, Progress of Theoretical Physics, **124**, 533-539 (2010)
- ② A. Matsuyama, T. Sato, T.-S. H. Lee, Physics Reports, **439**, 193-253 (2007)
- ③ H. Zhang, J. Tuplan, M. Shrestha, and D. M. Manley, Physical Review C, **88**, 035205 (2013)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① S. X. Nakamura, H. Kamano, Y. Hayato, M. Hirai, W. Horiuchi, S. Kumano, T. Murata, K. Saito, M. Sakuda, T. Sato, Y. Suzuki, “Towards a unified model of neutrino-nucleus reactions for neutrino oscillation experiments”, Reports on Progress in Physics 80, 056301 1-38 (2017), 査読有 (Invited Review Article)
DOI:10.1088/1361-6633/aa5e6c
- ② H. Kamano, T.-S. H. Lee, “Toward establishing low-lying Λ and Σ hyperon resonances with the $K\bar{p} + d \rightarrow \pi + Y + N$ reaction”, Physical Review C 94, 065205 1-13 (2016), 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.94.065205
- ③ H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S. H. Lee, T. Sato, “Isospin decomposition of $\gamma N \rightarrow N^*$ transitions within a dynamical coupled-channels model”, Physical Review C 94, 015201 1-14 (2016), 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.94.015201
- ④ S. X. Nakamura, H. Kamano, T. Sato, “Dynamical coupled-channels model for neutrino-induced meson productions in resonance region”, Physical Review D 92, 074024 1-33 (2015), 査読有
DOI:10.1103/PhysRevD.92.074024
- ⑤ H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S. H. Lee, T. Sato, “Dynamical coupled-channels model of $K\bar{p}$ reactions. II. Extraction of Λ^* and Σ^* resonances”, Physical Review C 92, 025205 1-16 (2015), 査読有

有

DOI:10.1103/PhysRevC.92.025205

- ⑥ H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S. H. Lee, T. Sato, “Dynamical coupled-channels model of $K\bar{p}$ reactions: Determination of partial wave amplitudes”, Physical Review C 90, 065204 1-40 (2014), 査読有 (Editors' suggestionとして掲載)
DOI:10.1103/PhysRevC.90.065204
 - ⑦ H. Kamano, “Impact of $\pi N \rightarrow \pi \pi N$ data on determining high-mass nucleon resonances”, Physical Review C 88, 045203 1-5 (2013), 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.88.045203
 - ⑧ H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S. H. Lee, T. Sato, “Nucleon resonances within a dynamical coupled-channels model of πN and γN reactions”, Physical Review C 88, 035209 1-51 (2013), 査読有 (Editors' suggestionとして掲載)
DOI:10.1103/PhysRevC.88.035209
 - ⑨ S. Ohnishi, Y. Ikeda, H. Kamano, T. Sato, “Signature of strange dibaryons in kaon- and photon-induced reactions”, Physical Review C 88, 025204 1-13 (2013), 査読有
DOI:10.1103/PhysRevC.88.025204
- [学会発表] (計 35 件)
- ① H. Kamano, “Dynamical coupled-channels approach to meson-production reactions in the nucleon resonance region”, 2016 2nd HaPhy Meeting on “Hadron productions: Theory and Experiment”, November 25th, 2016, Pohang (Korea) (招待講演)
 - ② H. Kamano, “Extraction of $N-N^*$ electro-magnetic transition form factors within ANL-Osaka dynamical coupled-channels approach”, INT Workshop on “Spectrum and Structure of Excited Nucleons from Exclusive Electroproduction”, November 15th, 2016, Seattle (USA) (招待講演)
 - ③ H. Kamano, “Comprehensive study of $S=-1$ hyperon resonances via the coupled-channels analysis of $K\bar{p}$ and $K\bar{d}$ reactions”, J-PARC Reimei Workshop on “New Exotic Hadron Matter at J-PARC”, October 25th, 2016, Incheon (Korea) (招待講演)
 - ④ H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S. H. Lee,

- T. Sato, "Isospin decomposition of the $\gamma N \rightarrow N^*$ transitions as input for constructing models of neutrino-induced reactions in the nucleon resonance region", 18th International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (NuFact2016), Quy Nhon, Vietnam, August 23th, 2016 (招待講演)
- ⑤ H. Kamano, "Comprehensive study of $S=-1$ hyperon resonances via the coupled-channels analysis of $K-p$ and $K-d$ reactions", The YITP Workshop on "Meson in Nucleus 2016" (MIN16), 京都大学(京都市), August 2th, 2016 (招待講演)
- ⑥ H. Kamano, "Modern dynamical coupled-channels calculations for extracting and understanding the nucleon spectrum", The 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016), 京都大学(京都市), July 29th, 2016 (全体講演)
- ⑦ H. Kamano, "Establishing $S=-1$ hyperon resonances using kaon-induced meson productions within dynamical coupled-channels approach", JLab workshop on "Physics with Neutral Kaon Beam at JLab" (KL2016), Virginia (USA), February 3th, 2016 (招待講演)
- ⑧ H. Kamano, "Light-quark baryon spectroscopy within ANL-Osaka dynamical coupled-channels approach", ECT* workshop on "Nucleon Resonances: From Photoproduction to High Photon Virtualities", Trento (Italy), October 13th, 2015 (招待講演)
- ⑨ H. Kamano, "Light-quark baryon spectroscopy from ANL-Osaka dynamical coupled-channels analysis", The 10th International Workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR2015), 大阪大学(大阪府豊中市), May 25th, 2015 (全体講演)
- ⑩ H. Kamano, "ANL-Osaka PWA for light-quark baryon spectroscopy", The International Workshop on Partial Wave Analysis for Hadron Spectroscopy (PWA 8/Athos 3), Virginia(USA), April 14th, 2015 (招待講演)
- ⑪ H. Kamano, "Toward construction of a unified neutrino-nucleus interaction model", 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan, Hawaii(USA), October 11th, 2014 (招待講演)
- ⑫ H. Kamano, "ANL-Osaka dynamical coupled-channels approach to baryon spectroscopy: Status and plans", ECT* Workshop on "Exciting Baryons: Design and Analysis of Complete Experiments for Meson Photo-production", Trento(Italy), June, 2014 (招待講演)
- ⑬ H. Kamano, "Recent results on N^* spectroscopy with ANL-Osaka dynamical coupledchannels approach", 15th International Conference on Hadron Spectroscopy (HADRON2013), 奈良県新公会堂(奈良市), Japan, November 4th-8th, 2013(基調講演)
- ⑭ H. Kamano, "Dynamical coupled-channels approach to light-flavor baryon spectroscopy", The 7th BLTP JINR-APCTP Joint Workshop "Modern problems in nuclear and elementary particle physics", Irkutsk(Russia), July 17, 2013 (招待講演)
- ⑮ H. Kamano, " N^* spectrum from ANL-Osaka dynamical coupled-channels analysis of pion and photon-induced meson production reactions", 13th International Conference on the Structure of Baryons (BARYONS2013), Glasgow(Scotland), June 25th, 2013 (全体講演)

[その他]
ホームページ等
<http://nuint.kek.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鎌野 寛之 (KAMANO, Hiroyuki)
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・博士研究員
研究者番号：00625361

(2) 研究協力者

佐藤 透 (SATO, Toru)
中村 聡 (NAKAMURA, Satoshi)
T.-S. Harry Lee (LEE, T.-S. Harry)