

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13545

研究課題名（和文）少数核子系から探る中間子原子核の新しい描像

研究課題名（英文）New picture of meson-nuclear states probed by few-body systems

研究代表者

山縣 淳子（Junko, Yamagata-Sekihara）

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：90548215

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中間子と原子核の束縛状態である中間子-原子核状態の理論的探究を行った。具体的には、J-PARC E62実験で得られた非常に精度の良い ^4He 、 ^3He に対するK中間子原子のデータよりK中間子-原子核間相互作用の情報を引き出し、これまで得られている多くのK中間子原子の実験データも同時に再現するポテンシャルパラメータを決定した。ポテンシャルの実部と虚部の関係がどのようにK中間子原子状態に影響をもたらすのかを考察し、実部と比べて虚部の大きさが大きいことがポイントであることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、精密測定された実験データより反K中間子と原子核の間の相互作用の情報を引き出すことができた。これまで我々が解明できた強い相互作用は、アップクォークとダウンクォークで構成される核子の間に働く核力のみである。そのため、ストレンジネスクォークを構成クォークに持つ反K中間子の性質を知ることは、強い相互作用の新たな知見を得ることになる。また、反K中間子は中性子星の構造とも密接に関連していると言われている。非常に高密度な天体である中性子星の存在可能性についての手がかりを提供できると期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we performed a theoretical calculation of the meson-nucleus state, which is the bound state of a meson and a nucleus. Specifically, we extracted information about the interaction between the K meson and the nucleus from highly accurate data on K mesic atoms obtained in the J-PARC E62 experiment for $^4\text{He-K}$ and $^3\text{He-K}$. We determined the potential parameters that simultaneously reproduce the experimental data of many K mesic atoms obtained so far. We investigated how the relationship between the real and imaginary parts of the potential affects the K mesic atom state, emphasizing that the magnitude of the imaginary part is significant compared to the real part.

研究分野：ハドロン原子核理論

キーワード：エキゾチック原子核 中間子-原子核束縛系 反K中間子 強い相互作用 量子色力学

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、存在が確立し性質が明らかになっているエキゾチック原子核は、 Λ バリオンを束縛させた Λ ハイパー核のみであった。その他のエキゾチック原子核に関しては、実験・理論の両面から幅広い探索と性質解明が進められている状況にあった。

エキゾチック原子核の中でも中間子が束縛した中間子原子核については、理論的に議論され、その存在や性質が予想されてきた。歴史的には理論が先行してきたのだが、研究開始当初は J-PARC をはじめとする実験施設の飛躍的充実により、実験データと理論計算を比較する段階に達しつつあった。

2. 研究の目的

本研究では、10年後やそれ以降の中間子原子核研究を見据えた計画を立てた。具体的には、10年後に得られるであろう実験の系統性とデータの精密化を考慮し、また研究の主流となりうる新しい方向性を開拓することを目指した。10年後の研究の土台を築くため、本研究では個性が明確に発現しやすく取り扱いも容易な中間子-少数系原子核に焦点を絞り、その存在と性質を理論的に探究した。これらを通じて、中間子を含んだ少数系原子核の新しい描像をさぐるのが、本研究の目的であった。

3. 研究の方法

本研究では主に3つの視点から中間子-少数系原子核状態の研究を行なった。

(1) $K\bar{K}D\bar{K}N$ 状態

今後の実験の発展を考え、2つの中間子と核子が束縛するかに注目して理論計算を行なった。反 K 中間子と核子は $\Lambda(1405)$ 粒子、反 K 中間子と反 D 中間子は D_{s0} 粒子を形成するという理論計算があり、また反 D 中間子と核子も弱く束縛するという理論予言もなされている。それぞれの2体の相互作用を考慮し、ガウス展開法を用いてシュレディンガー方程式を解くことにより束縛状態を調べた。

(2) 反 K 中間子ビームを用いた $\Lambda(1405)$ 粒子の生成

$\Lambda(1405)$ 粒子は、反 K 中間子と核子の束縛状態と期待される粒子である。J-PARC E31 実験では重陽子標的、J-PARC E15 実験では ^3He 標的を用いて、 $\Lambda(1405)$ 粒子が崩壊した π 中間子と Σ 粒子を観測している。本研究では、高いエネルギーをもって入射した反 K 中間子が標的の中の子核を前方に叩き出すことで、エネルギーを失い遅くなった反 K 中間子が残りの核子と反応することで $\Lambda(1405)$ 粒子を生成する、という過程を考えた。

(3) ^3He 、 ^4He - K 中間子原子状態の精密計算

J-PARC で行われた反 K 中間子ビームを用いた ^4He 、 ^3He に対する K 中間子原子の精密測定に関する理論計算を行った。これまで得られている実験データと比べると非常にエラーバーの小さいデータが観測されており、この結果より未だ確定していない K 中間子と原子核の間の相互作用について情報を得られることが期待される。 K 中間子原子状態は、主要な相互作用がクーロン力であり、強い相互作用の影響は非常に小さい。しかし、精密測定を行うことで、この小さな強い相互作用の影響が K 中間子原子状態にどのようにあらわれているのか明らかにできるのではないかと期待される。束縛状態の計算は Klein-Gordon 方程式を用い、これまで得られている実験データを再現するポテンシャルを用いた際にポテンシャルの違いが束縛エネルギーにどの程度反映されるのか調べた。さらに、密度比例型のポテンシャルを導入し、実験データを再現するようにパラメータを決めた。

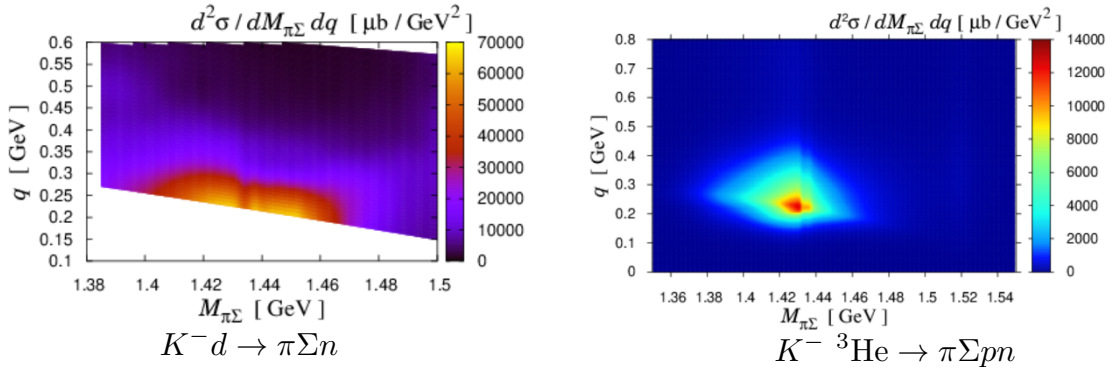
4. 研究成果

(1) $K\bar{K}D\bar{K}N$ 状態

ガウス展開法を用いてシュレディンガー方程式を解いた結果、 $K\bar{K}D\bar{K}N$ 系は束縛することがわかった。さらに、2体間のアイソスピンの寄与を調べることで、計算した3体系はアイソスピン0の $K\bar{K}D\bar{K}$ 系に陽子が弱く束縛した状態であることを示した。このような3体系は、 B 中間子の崩壊過程で現れることが期待できる。上記の研究成果は、第5回日米物理学会合同核分科会で口頭発表を行い、学術雑誌 PRC 誌に掲載された。(J. Yamagata-Sekihara, T. Sekihara, Phys. Rev. C100 (2019) 015203.)

(2) 反K中間子ビームを用いた $\Lambda(1405)$ 粒子の生成

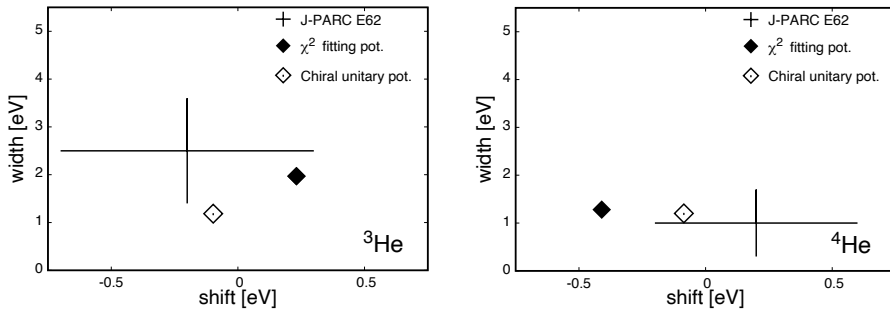
重陽子標的、 ^3He 標的に関して $\pi\Sigma$ 不変質量と運動量移行に対する二重微分断面積を計算し、それぞれ実験データと比較を行なった。その結果、標的中の中性子を叩き出した後の反K中間子の運動量が低いところでは実験データをよく再現することができた。一方で、反K中間子の運動量が大きいところでは再現することができず、最初に反K中間子が標的中の中性子と反応する散乱振幅を改善する必要があることがわかった。上記研究成果について、2019年日本物理学会秋季大会で口頭発表を行った。



(3) ^3He , ^4He -K中間子原子状態の精密計算

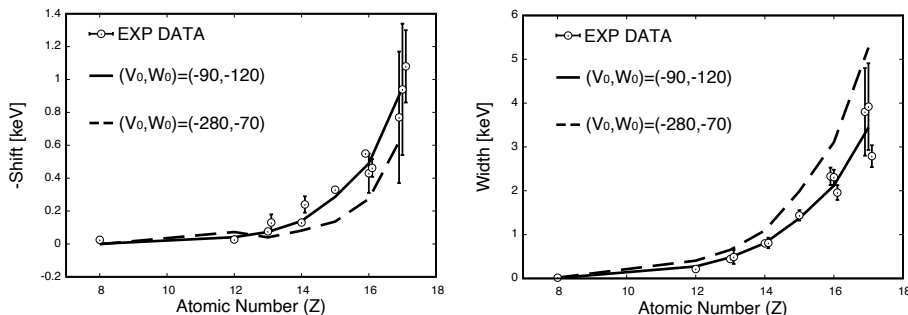
少数多体系の計算で求められた ^3He , ^4He 原子核の密度分布を用いてKlein-Gordon方程式を解くことで、束縛状態を計算した。その際用いたK中間子-原子核ポテンシャルは、(i) これまで観測されているK中間子原子の実験データを広く再現する、カイラルユニタリーモデルと χ^2 fittingポテンシャル、(ii) 通常原子核密度におけるポテンシャルの強さをパラメータとした現象論的なポテンシャルを用いた。

まず、(i)については明確に2つのポテンシャルの差が見られず、この結果からは2つのポテンシャルの優越をつけることが難しいということがわかった。2つのポテンシャルの差が見るのは、どのような原子核に対してK中間子が束縛したときなのか今後調べていく必要がある。



次に、(ii)については、今回得られた実験データを再現するようにパラメータフィットすることにより $(V_0, W_0) = (-90, -120)$ MeV と $(-280, -70)$ MeV という代表的な2つのポテンシャルが得られた。さらに、得られたポテンシャルがこれまで得られているK中間子原子の実験データをどの程度再現するのか調べたところ、 $(V_0, W_0) = (-90, -120)$ MeV のポテンシャルは非常に広く実験データを再現することがわかった。非常にシンプルな形のポテンシャルではあるものの、少数系のデータが精密測定されたものであるということから、これほど広く実験データを再現することができたと思われる。この研究では、K中間子原子を考えるため、ポテンシャルのエネルギー依存性は考慮していない。K中間子原子核と議論をつなげるためには、エネルギー依存性を今後考慮していく必要がある。

上記研究成果は、2023年日本物理学会春季大会で口頭発表し、現在論文を執筆中である。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Yamagata-Sekihara Junko, Sekihara Takayasu	4. 巻 100
2. 論文標題 KbarDbarN molecular state as a “uudsbar pentaquark” in a three-body calculation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.015203	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 Yutaro Iizawa, Daisuke Jido, Natsumi Ikeno, Junko Yamagata-Sekihara, Satoru Hirenzaki	4. 巻 1907.05626
2. 論文標題 Origin of energy shift in kaonic atom and kaon-nucleus interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ArXive	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.1907.05626	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 J. Yamagata-Sekihara
2. 発表標題 Theoretical aspect of kaonic atoms - Optical potential from J-PARC E62 -
3. 学会等名 International workshop on "Hadron physics with kaon beam and related topics (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山縣淳子
2. 発表標題 K中間子ヘリウム原子とK中間子 - 原子核相互作用の理論的考察
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山縣淳子、比連崎悟
2. 発表標題 K中間子ヘリウム原子の高精度測定から考察するK中間子 - 原子核相互作用
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山縣淳子
2. 発表標題 K- ビームと重水素・3He標的による (1405)生成反応の理論計算
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Yamagata-Sekihara
2. 発表標題 KbarDbarN molecular state as a "uudscbar pentaquark" in a three-body calculation
3. 学会等名 第5回日米物理学会合同核物理分科会(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山縣淳子、比連崎悟
2. 発表標題 K中間子ヘリウム原子とK中間子 - 原子核相互作用の理論的考察
3. 学会等名 日本物理学会2023春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 J. Yamagata-Sekihara
2. 発表標題 Updating the theoretical calculation of the kaonic production of $\Lambda(1405)$ off deuteron target
3. 学会等名 RCNP workshop on Hadron Physics at the LEPS2 photon beamline (招待講演)
4. 発表年 2023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
---------	---------