

機関番号：82118

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19740163

研究課題名（和文） ストレンジネスを持つ原子核におけるエキゾチックな性質の研究

研究課題名（英文） Exotics in the nuclear system with strangeness

研究代表者

土手 昭伸 (DOTE AKINOBU)

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：90450361

研究成果の概要（和文）：

ストレンジクォークをもつ反K中間子を含む原子核「K中間子原子核」は高密度状態形成など様々なエキゾチックな性質を持つと考えられる。K中間子原子核の性質を明らかにするため、K⁻中間子と二つの陽子からなる三体系K⁻pp（最も基本的なK中間子原子核）を理論的に極力近似をすることなく調べた。その結果K⁻からの強い引力があるものの、核子間の強い斥力のためにpp間距離は極端には小さくならないが、しかし普通の原子核の内部の密度に対応する程度の距離なっていることが確認できた。

研究成果の概要（英文）：

“Kaonic nuclei” which mean nuclei with anti-kaon containing a strangeness quark are considered to have exotic properties such as highly dense state. In order to reveal the nature of kaonic nuclei, we have investigated the most essential kaonic nucleus “K⁻pp” (a system consist of a K⁻ meson and two protons) theoretically with a little approximation. As a result, it is found that the very strong repulsion between two nucleons prevents two protons getting close to each other, in spite that the strong attraction from K⁻ meson makes them approach to each other. The distance between two protons in K⁻pp is confirmed to be nearly equal to that for a normal nucleus. Therefore, we consider that the K⁻pp is a state with the normal density, not highly dense.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,100,000	660,000	3,760,000

研究分野：原子核理論

科研費の分科・細目：物理学／素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：軽い原子核、ストレンジネス、K中間子原子核、エキゾチック、ハイパー核

1. 研究開始当初の背景

ストレンジネスクォークを含む反K中間子 (K⁻, K⁰_{bar}中間子、以下K^{bar}と総称) と核子 (陽子 p, 中性子 n, 以下Nと総称) の間には非常に強い引力が働くことが現象

論的研究により示唆されていた。ハイペロン Λ の励起状態である $\Lambda(1405)$ は単純に3つのクォークでは記述することが難しいことが知られており、むしろK^{bar}とNが27 MeV束縛した I = 0 の状態と考えるのが妥

当と考えられてきた。つまり $K^{b a r} N$ 相互作用は、特にアイソスピン $I = 0$ のチャンネルにおいて束縛状態を作るほど強く引力的である。このことから $K^{b a r}$ が原子核内部に入ると深く束縛されるだけでなく、その周りに核子を引き寄せ、通常核密度 (0.17 fm^{-3} 、以下 ρ_0) の数倍に達する高密度状態が形成されることが、いくつかの理論計算によって示された。^{1), 2)}

安定に存在する原子核内部の密度は ρ_0 であることは教科書にも載っている原子核物理の常識である。それが $K^{b a r}$ 一つによって崩され、高密度状態を形成するという指摘は非常に驚くべきことである。また高密度状態ではカイラル対称性が部分的に回復するなど、ハドロン物理においても重要なトピックでもある。

このような理論研究の予想に刺激され、 K 中間子原子核 ($K^{b a r}$ が内部に束縛した原子核) の探索実験がなされていた。そんな中 2005 年に FINUDA グループ (INFN, Frascati, Italy) によって、 K^- が二つの陽子に束縛された $K^- p p$ らしきシグナルが確認された。³⁾ この発見もあり、 K 中間子原子核研究は盛り上がりを見せていた。

参考文献

- 1) Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. C65, 044005 (2002)
- 2) A. Dote, H. Horiuchi, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. C70, 044313 (2004)
- 3) M. Angello *et al.* (FINUDA collaboration), Phys. Rev. Lett. 94, 212303 (2005)

2. 研究の目的

数倍の ρ_0 もの高密度状態を形成するといった、原子核物理の常識を覆すようなことが K 中間子原子核において果たして起きるのであるか? 一つの計算結果をもって、 K 中間子原子核の性質を結論付けるのは非常に危険である。実際、高密度状態形成を予言した理論計算には大きく次の 2 つの問題点があり、批判が出ていた:

(1) 斥力芯をなました有効 NN 相互作用の使用

NN 散乱実験データ (位相差) を再現する NN 相互作用 (現実的核力) には短距離で非常に強い斥力 (斥力芯) があることが知られている。先の計算で使用されている多体系の模型波動関数では空間部分の記述に制限があるため、斥力芯をそのまま扱うと計算が破たんする。そのため原子核物

理で使われてきた伝統的な手法 G-matrix 法により斥力芯がなまされ、模型波動関数にマッチした有効 NN 相互作用が使用されている。しかし得られた結果を見ると G-matrix 法の適用限界を超えていた可能性が考えられる。

(2) 現象論的相互作用の信頼性

$K^{b a r}$ 中間子も π 中間子同様、カイラル対称性の破れに起因する南部・ゴールドストーンボソン (NG ボソン) である。NG ボソンである $K^{b a r}$ と核子との相互作用はカイラル SU (3) 理論により求められる。 $K^{b a r} N$ は $\pi \Sigma$ と強く結合する。カイラル SU (3) 理論によると結合する $\pi \Sigma$ 間にも比較的強い引力が働くことが予言されているが、現象論的な相互作用では $\pi \Sigma$ 間の相互作用が無視されている。

FINUDA 実験で報告されたこともあり、いきなり複雑な多体系に進むのではなく、最も簡単な K 中間子原子核 $K^- p p$ (三体系) を、これらの問題点に注意しながら丁寧に調べ、その性質の詳細を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

2. の中で指摘した二つの問題点に以下のように対処し、 $K^- p p$ の性質を調べた。

(注意: 正確には $K^{b a r} N N - \pi Y N$ 結合系である。(Y = Λ , Σ) スピン・パリティ $J^\pi = 0^-$, アイソスピン $T = 1/2$, 核子系スピン $S_{NN} = 0$ を考えている。この状態が非常に強い引力である $I = 0$ $K^{b a r} N$ 成分を最も多く含み、一番安定になる。以下、この状態をシンボリックに " $K^- p p$ " と書くことにする。)

(1) NN 相互作用として強い斥力芯をもつ現実的核力を使用

使用する現実的核力 Argonne v18 は 3 GeV に達する斥力芯を持つ。

(2) カイラル SU (3) 理論に基づく有効 $K^{b a r} N$ 相互作用を使用

カイラル SU (3) 理論が予言する $K^{b a r} N$ 散乱振幅を正しく再現する有効 $K^{b a r} N$ ポテンシャルを使用。エネルギー依存・複素・空間座標表示・局所型ポテンシャル。空間依存性はシングルガウシアンを仮定。

(3) ガウス基底関数を用いた変分法による構造計算

$K^{b a r} N$ 間及び NN 間相対波動関数を異なるレンジを持つガウス基底で展開し、ハミルトニアンを対角化することで $K^- p p$ 三体系の基底状態を求める。エネルギーが

収束するまで十分に基底関数を増やすことで、そのハミルトニアン¹⁾の真の基底状態を得ることが出来る。波動関数の空間部分の記述に制限がないため、斥力芯をなますことなくそのまま扱える。

変分法ではエネルギーだけでなく波動関数も得られる。求められた波動関数を解析することで、 K^-pp の構造について詳細を知ることが出来る。

4. 研究成果

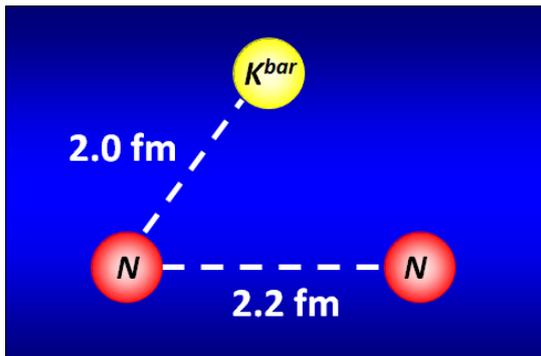
3. で述べたように(1) 現実的核力(Argonne v18 NN ポテンシャル)、及び(2) カイラルSU(3)理論に基づく有効 $K^{\bar{b}ar}N$ ポテンシャルを用い、(3) ガウス基底展開による変分法によって、 K^-pp 三体系の計算を行った。

カイラル理論に基づく4種の $K^{\bar{b}ar}N$ 相互作用を試した。また $K^{\bar{b}ar}N$ 相互作用はエネルギー依存性を持つが、 K^-pp 中での部分系 $K^{\bar{b}ar}N$ のエネルギーの決め方として2通りの処方を試した。結局得られた結果には大差はなく、

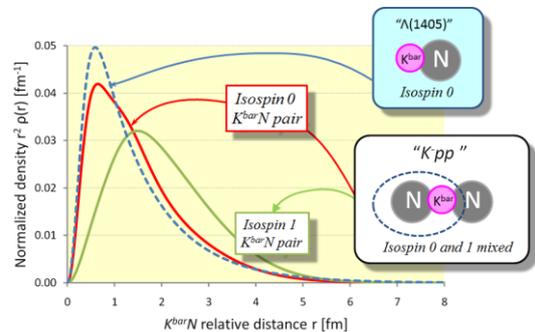
$$\begin{aligned}
 &K^-pp \text{ 全束縛エネルギー} \\
 &= 2.0 \pm 3 \text{ MeV} \\
 &\pi \text{ 中間子を伴う崩壊幅} \\
 &= 4.0 \sim 7.0 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

という結果であった。つまり K^-pp は浅い束縛、そして広い崩壊幅であるということになる。

得られた波動関数を使って、 K^-pp の様々なサイズを調べた。まずNN間であるが、その相対距離は2.2 fmであった。二核子系唯一の束縛状態である重陽子の二核子間距離(約4 fm)よりは小さい。しかし通常原子核内部のNN間距離は約2 fmであり、ほぼ同程度である。つまり K^-pp は通常原子核内部の断片に相当し、**密度としては ρ_0 程度**であると言える。間の斥力芯によって、高密度状態に匹敵するほどに二核子が近づくことが出来なかった結果である。



$K^{\bar{b}ar}N$ 間距離は2.0 fmであった。ここで $K^{\bar{b}ar}N$ をアイソスピン $I=0$ と $I=1$ の成分毎の距離を見てみると面白い。 $I=1$ 成分の距離は2.3 fmに対し、 $I=0$ 成分は1.7 fmと小さい。これは $K^{\bar{b}ar}N$ 相互作用が $I=0$ チャンネルで特に引力的であるという事実を反映した結果である。この様子は各アイソスピン毎の $K^{\bar{b}ar}N$ 相関密度分布を見ることで直接確認できる。図には K^-pp 中の $I=0$ $K^{\bar{b}ar}N$ 成分の相関密度分布を赤線、 $I=1$ 成分を緑線で示した。見て分かるように $I=0$ 成分(赤線)は、 $I=1$ 成分(緑線)よりもコンパクトに分布している。青線は真空中での $I=0$ $K^{\bar{b}ar}N$ 相関密度である。つまり $I=0$ $K^{\bar{b}ar}N$ の準束縛状態である $\Lambda(1405)$ に対応する。図に示したように青線は赤線と非常に似ている。すなわち K^-pp 中の $I=0$ $K^{\bar{b}ar}N$ 成分はほとんど $\Lambda(1405)$ と同じであることを意味する。 **K^-pp 中でも $\Lambda(1405)$ が生き残っている**と言える。



以上のような結果を得たが、まだまだ問題は残っていると思われる。本研究では $K^{\bar{b}ar}N$ チャンネルと強くカップルする $\pi\Sigma$ チャンネルは直接扱われておらず、その効果は有効 $K^{\bar{b}ar}N$ 相互作用に繰り込まれている。Faddeev-AGSを用いた他のグループの計算¹⁾では K^-pp の全束縛エネルギーは約80 MeVと我々の結果に比べかなり大きい。ここでは $\pi\Sigma$ チャンネルは直接扱われており、結果の違いの要因の一つとして $\pi\Sigma N$ 三体のダイナミクス²⁾の効果が挙げられている。我々の研究でも $\pi\Sigma$ チャンネルを直接取り扱った計算を行うのが望ましく、現在取り組んでいるところである。(結合チャンネル複素スケールリング法)

またFINUDAグループ、さらには2010年に報告されたDISTOグループ(Sacclay, France)²⁾で観測されたシグナルが、もし K^-pp の束縛状態であるならば、その束縛エネルギーは100 MeV以上である。(FINUDA: 116 MeV, DISTO: 103 MeV) 他方我々の結果も含め理論研究は100 MeV以下の束縛エネルギーを予言している。実験で観測されたシグナルの解釈も含め、理論・実験での

結果の違いも理解されないといけない。

参考文献

- 1) T. Yamazaki et al. (DISTO collaboration), Phys. Rev. Lett. 104, 132502 (2010)
- 2) Y. Ikeda and T. Sato, Phys. Rev. C76, 035203 (2007)

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 18件)

- ① 土手昭伸, 井上貴史, 明孝之, "Application of coupled-channel Complex Scaling Method to $\Lambda(1405)$ ", AIP Conference Proceedings, Volume 1388, page 589-592, 2010, 査読無
- ② 土手昭伸, 井上貴史, "K-pp studied with Coupled-channel Complex Scaling method", Acta Physica Polonica B, 41, page 323-328, 2010, 査読有
- ③ 土手昭伸, "Structure of a prototype of kaonic nuclei "K-pp"", Progress of Theoretical Physics Supplement, 186, page 363-366 (4 pages), 2010, 査読有
- ④ 土手昭伸, 兵藤哲雄, Wolfram Weise, "Variational calculation of the ppK-system based on chiral SU(3) dynamics", Physical Review C, 79, page 014003/1-16, 2009, 査読有
- ⑤ 土手昭伸, 兵藤哲雄, Wolfram Weise, "Kpp system with chiral SU(3) effective interaction", Nuclear Physics A, 804, page 197c-206c, 2008, 査読有

[学会発表] (計 43件)

- ① 土手昭伸, 井上貴史, 明孝之, "Application of coupled-channel Complex Scaling Method to $\Lambda(1405)$ ", International conference on the structure of baryons (BARYONS '10), 2010年12月7-11日, Convention center, 大阪大学
- ② 土手昭伸, 兵藤哲雄, Wolfram Weise, "Structure of kaonic nuclei - Essential Kbar cluster K-pp -", International workshop on "New Frontiers of QCD (NFQCD10)", Hadrons in Nuclei part,

Joint symposium of theory and experiment, 2010年2月15-3月5日, 京都大学 基礎物理学研究所

- ③ 土手昭伸, "Exotic nuclear systems with strangeness: Hypernuclei and Kaonic nuclei", 第7回日本中国原子核物理シンポジウム "7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium", 2009年11月9-13日, 筑波大学 大学会館
- ④ 土手昭伸, 兵藤哲雄, Wolfram Weise, "Variational calculation of K-pp with a chiral SU(3)-based KbarN potential", The International Conference on Particles And Nuclei (PANIC08), 2008年11月13日, Dan panorama hotel, Eilat, Israel

[図書] (計 3件)

- ① 土手昭伸, 「ストレンジネスが拓くエキゾチックな原子核の世界」, 原子核研究, Vol.55 Supplement 1 2010年夏の学校特集号, page 13-37 (25 pages), 2011
- ② 土手昭伸, "Kaonic nuclei : new dimension in nuclear physics ~ A prototype of kaonic nuclei "K-pp" with chiral SU(3) theory ~", KEK Annual Report 2008, Vol.1 Research Highlights, page 44-45 (2 pages), 2010
- ③ 木村真明、土手昭伸、大西明、松宮浩志, 「反対称化分子動力学法を用いたエキゾチック原子核構造研究入門」, 原子核研究, Vol.53 Supplement 2 特集号「エキゾチック原子核実践講座」-あなたも計算できる-、科研費特定領域「ストレンジネスで探るクォーク多体系」理論班サマースクール報告1, page 50-104, 2009

[その他]

ホームページ等
KEK 英語 Web 特集記事 (Feature story)
2010年2月 "A spice of strangeness"
<http://www.kek.jp/intra-e/feature/2010/StrangeHadronTheory.html>
林田氏 (KEK コミュニケーター) 作成、土手 監修

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
土手 昭伸 (DOTE AKINOBU)
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：90450361

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし