

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21340050

研究課題名(和文) K中間子凝縮核の実験的理論的研究

研究課題名(英文) Experimental and theoretical investigation of kaon condensed nuclei

研究代表者

山崎 敏光 (Yamazaki, Toshimitsu)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：80011500

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：2002年に予言された高密度K中間子核の実験的理論的研究が進められた。K-ppが陽子陽子衝突反応で強く生成されるとの予言どおり、DISTO実験pp-> +p+K+ 反応の解析から、100MeVもの深い束縛エネルギーをもつ状態K-ppが見つかった。Faddeev-Yakubovsky法を用いたK-pp, K-K-ppなどの構造計算がKbarN相互作用を広範囲に変えて行われた。K-ppの束縛エネルギーの観測値は、標準相互作用における計算値の約2倍もあり、カイラル対称性の部分的回復によるものと理解された。二重K中間子原子核K-K-ppは陽子陽子衝突反応で生成されることが理論計算によって示された。

研究成果の概要(英文)：Experimental and theoretical studies on the newly predicted high-density kaonic nuclear systems were advanced. In accordance with the theoretical prediction we analyzed old experimental data of DISTO on the pp->Lambda +p+K+ reaction, which revealed a strong peak due to K-pp with a binding energy around 100 MeV. Extensive Faddeev-Yakubovsky calculations were carried out on K-pp, K-K-pp, etc by varying the strength of the Kbar-N interaction. The observed binding energy of K-pp, a factor of 2 larger than the standard theoretical value, is understood in terms of chiral symmetry restoration effect in dense nuclei. We predicted and calculated the production cross section of the double kaonic nuclei, K-K-pp in high-energy pp collisions.

研究分野：数物系科学

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：K中間子 K中間子原子核 高密度原子核 K中間子凝縮

1. 研究開始当初の背景

2002年、われわれは、反K中間子・核子間相互作用を現象論的に導出し、それからK-中間子を構成子とするK-中間子核 K-p, K-pp, K-ppnなどが準安定に存在できること、さらにそれらK原子核は、K-N相互作用の強い引力によって縮小し、その核密度は通常核の3倍にもなることを理論的に予言した。この結論はすぐ後に土手らの理論的研究で追認された。原子核が重力の助け無しに中性子星密度程度に凝縮するという理論的帰結は、原子核密度 = 一定という核物理学の大法則を大きく破るもので、理論的実験的議論を呼ぶことになった。

強い引力の出発点は $\Lambda(1405)$ 共鳴として知られるK-p束縛状態(以下 Λ^* と呼称)である。2002年に予言されたK原子核の原始形態K-ppの深い束縛状態は、このK-pに陽子が近接するとき、実のKが二つの陽子間を回遊し、それがつくる共有結合によって通常核力を越える束縛力が生ずるためとされた。この「K中間子が作り出す超強核力」のメカニズムは2007年に明らかにされた。さらに同じ年、K-ppは $\Lambda^* + p \leftrightarrow p + \Lambda^*$ という構造をもつため、その核密度が高ければ、ppの高エネルギー衝突において生まれる Λ^* がドアウエー粒子となって、高い確率で生成する、という驚くべき理論的帰結が得られた。これを実験的に証明することが最重要な課題となってきた。

2. 研究の目的

(1) pp衝突におけるK-ppの生成を実験データに照らして検討。そこからK核に関する実験的情報を得る。その束縛エネルギーなどの決定。

(2) 我々の出発点である Λ^* アンザツに対して、カイラルダイナミックスの理論から $I=0$ Kbar-N相互作用の引力は強くはないとの主張がなされている。この問題を実験/理論両面から検討する。

(3) さらに2004年に予言された二重K原子核K-K-ppの構造の精密計算を行う。

(4) K-K-ppを生成させる反応を検討する。pp反応においてドアウエーである $\Lambda^* + p$ からが大量に生まれるとの予言の実験的検証が成功したので、これを二つの Λ^* ドアウエーに拡張すると、pp衝突点において $\Lambda^* - \Lambda^* \rightarrow K-K-pp$ 過程を通して二重K中間子核が大量に生ずると予測される。この実験法を検討し、近い将来、J-PARCで実現させる方策を立てる。

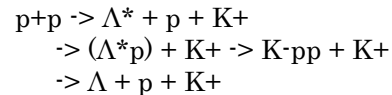
(5) 重イオン衝突実験においてK原子核が生成するか検討する。

(6) J-PARCにおける新しい検証実験の実施と得られる知見の検討

3. 研究の方法

(1) pp衝突におけるK-ppの生成

エネルギー2.85 GeVの陽子で次の反応を起こさせる。



この高エネルギー反応では、衝突距離は短く、 (Λ^*p) というドアウエー状態を経て高密度K-ppとなりやすい。

このためにGSI研究所のFOPIおよびHADES検出器を使う検討が進み、テスト実験も行われた。

その間、サクレ研究所においてDISTOグループが他の目的のために取得した大量のデータを利用できることが分かった。トリノ大学Marco Maggiora教授、ミュンヘン工科大学Paul Kienle教授、同Ken Suzukiとの緊密な共同研究が始まった。

(2) J-PARCにおける検証実験 2013年に我が国に創設された国際的陽子加速器施設J-PARCにおいて、K中間子、パイ中間子のビームを使うK核の探索に向けた種々の実験が開始された。既に本報告作成の時点において、顕著な結果が現れ始めている。特に、DISTOと異なる手法でDISTOの結果が確認されようとしていることは注目に値する。

(3) 二重K中間子核K-K-ppの構造をFaddeev-Yakubovskii理論を用いて計算する。

(4) 二重K中間子核K-K-ppの生成法の理論的研究を進める。

4. 研究成果

(1) DISTO実験データの解析

われわれが見つけた重要なことは、 $\Lambda + p + K^+$ 事象のうち、通常のバックグラウンドプロセスは前方後方に放出されるpを含むので除外できることである。大角度で放出されるpを含む事象の中に、 $IM(p\Lambda)$ と $MM(K^+)$ のどちらにも、 Λ^* の生成断面積に匹敵する大きなピークが現れた。この事実を理論的予言と組み合わせると高密度の $X=K\text{-pp}$ が生成していると結論できる。その質量、幅は

$$\begin{aligned} M(X) &= 2265 \pm 7 \text{ MeV}/c^2, \\ G(X) &= 120 \text{ MeV} \end{aligned}$$

であった。

(2) Faddeev-Yakubovskii法を用いたK-p, K-pp, K-K-p, K-ppn, K-K-ppの構造の計算

を \bar{K} -N 相互作用の強さを広範囲に変えて行った。引力相互作用の増加につれて束縛エネルギーは増加し、特に二重 \bar{K} 核 \bar{K} - \bar{K} -pp において著しい。 \bar{K} -pp の束縛エネルギーの観測値 (DISTO) は、標準相互作用における計算値の約 2 倍もある。その大きさは相互作用を約 20% 増加したものに対応することが分かった。

\bar{K} -N 相互作用が 20% 増大していることの一つの原因として、パイ中間子束縛状態で見られた (K. Suzuki et al., PRL 92 (2004) 072302) ような、カイラル対称性の部分的回復が考えられる。パイ中間子-核子系ではアイソベクター相互作用の反撥力が増したのに対して、 \bar{K} -N 系では $I=0$ 引力が増大し、その相乗効果で大きな凝集効果が生ずる。これを具体的に考察するため、Brown-Kubodera-Rho のモデルをとり、計算した \bar{K} -pp 中の核子体積がどのくらい QCD 真空のクオーク凝縮を妨げるかが評価され、20% の引力増大はカイラル対称性の部分的回復によるとの理解が進んだ。

(3) \bar{K} - \bar{K} -pp 探索新実験の提案 pp 衝突で二つの Λ^* を同時に同一場所に生成させ、これをドアウェーとして \bar{K} - \bar{K} -pp を生成する方法が提起され、二つの論文に計算結果が発表されて。この新しい方法の断面積、生成核の崩壊モードを計算し、実験装置の計画に反映させるのは今後の課題である。

(4) われわれの理論の前提である Λ^* 共鳴が \bar{K} -p の深い束縛状態であることを検証するため、既存の実験データを、広い共鳴幅と崩壊閾値を考慮したチャネル結合理論で解析した。その結果、そのポールは 1405 MeV にあること、いわゆるカイラル理論の二重ポールの予言は実験データから支持されないことが明らかとなった。この結果は Particle Data Group によって採用されている。さらにこの問題を追及するための実験手法が提案された。

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、発表雑誌はすべて査読付き)

[雑誌論文](計 23 件)

1. "Strong binding and shrinkage of single and double \bar{K} nuclear systems (\bar{K} -pp, \bar{K} -ppn, \bar{K} - \bar{K} -p and \bar{K} - \bar{K} -pp) predicted by Faddeev-Yakubovsky calculations" S. Maeda, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Proc. Jpn. Acad. Ser. B **89**, 418-437 (2013)
2. "Theoretical analysis of $\Lambda(1405) \rightarrow (\Sigma, \pi)0$ mass spectra produced in $p + p \rightarrow p + \Lambda(1405) + K^+$ reactions", M. Hassanvand, Y. Akaishi, T. Yamazaki, Phys. Rev. **C 87**, 055202 (2013)
3. "Theoretical investigation into production of double-Lambda hypernuclei from stopped Ξ^- on 6Li ", Aye Aye Min, Khin Swe Myint, J. Esmaili, Y. Akaishi, Few-Body System **54** (2013) 381-385
4. "Formation of the $S = -1$ resonance $X(2265)$ in the reaction $pp \rightarrow X + K^+$ at 2.50 and 2.85 GeV", P. Kienle, M. Maggiora, K. Suzuki, T. Yamazaki, et al., Eur. Phys. J. A **48** (2012) 183 (5 pages)
5. "Deeply bound pionic states in heavy nuclei", T. Yamazaki, S. Hirenzaki, R.S. Hayano and H. Toki, Phys. Rep. **514** (2012) 1-87
6. "Deformation of palladium plates by a small external stress during hydrogen absorption and desorption", A. Kawasaki, S. Itoh, K. Shima and T. Yamazaki, Mater. Sci. Eng. A **551** (2012) 231-235
7. "Toward cold and dense antikaonic nuclear clusters", T. Yamazaki, Hyperfine Int. **211** (2012) 69-75
8. "The K1.8BR spectrometer system at J-PARC", K. Agari, et al. T. Yamazaki ~ (84 名中 8 2 番目), Prog. Theor. Exp. Phys. **2012** 02B011 (28 pages)
9. "Theoretical investigation of the formation of \bar{K} - \bar{K} -pp in high-energy proton-proton collisions", M. Hassanvand, Y. Akaishi, and T. Yamazaki, Phys. Rev. C **84** (2011) 015207
10. "New way to produce dense double-antikaonic dibaryon system, \bar{K} nuclear systems, through $\Lambda(1405)$ doorway sticking in $p + p$ collisions", T. Yamazaki, Y. Akaishi, and M. Hassanvand, Proc. Jpn. Acad., Ser. B **87** (2011) 362-370
11. "Resonant formation of $\Lambda(1405)$ by stopped- \bar{K} -absorption in the deuteron", J. Esmaili, Y. Akaishi, T. Yamazaki,

- Phys. Rev. C **83** (2011) 055207
12. "Indication of a Deeply Bound and Compact K^- pp State Formed in the $pp \rightarrow p \Lambda K^+$ Reaction at 2.85 GeV",
T. Yamazaki et al.,
 Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 132502
13. "Single-pole nature of $\Lambda(1405)$ and structure of K^-pp ",
Y. Akaishi, T. Yamazaki, M. Obu, M. Wada,
 Nucl. Phys. A **835** (2010) 67-74
14. "DISTO data on K^-pp ",
 M. Maggiora, P. Kienle, K. Suzuki, T. Yamazaki, on behalf of the DISTO collaboration,
 Nucl. Phys. A **835** (2010) 43-50
15. "Search for strange tribaryons in the $4\text{He}(K^- \text{ stopped}, p)$ reaction",
 H. Yim *et al.* T. Yamazaki,
 Phys. Lett. B **688** (2010) 43-49
16. "ANN three-body force due to coherent Λ -Sigma coupling",
Y. Akaishi,
 Prog. Theor. Phys. **186** (2010) 378-383
17. "Feshbach resonance due to coherent Λ -Sigma coupling in $7\Lambda\text{He}$ ",
 San San Mon, Tin Tin Nwe, Khin Swe Myint, Y. Akaishi,
 Nucl. Phys. A **835** (2010) 443-446
18. "Three-Body Force and the Limit of Oxygen Isotopes",
 T. Otsuka, T. Suzuki, J. Holt, A. Schwenk, Y. Akaishi,
 Phys. Rev. Lett. **105** (2010) 032501
19. "Measurement of $K^*(892)^*$ and K_0 mesons in $\text{Al}+\text{Al}$ collisions at 1.94 A GeV",
 X. Lopez *et al.* T. Yamazaki (61 名中 61 番目),
 Phys. Rev. C **81** (2010) 061902(R)
20. "First exclusive measurement of the K^-pp state populated in the $pp \rightarrow K^+\Lambda p$ reaction at 2.85 GeV",
T. Yamazaki et al.,
 Hyperfine Interactions **193** (2009) 181-187
21. "Structure of K^-pp system and super-strong nuclear force by migrating $K^{\wedge-}$ meson: Its theoretical background",
Y. Akaishi, T. Yamazaki,
 Int. J. Mod. Phys. A **24** (2009) 2118-2125
22. "Measurement of the In-Medium K_0 Inclusive Cross Section in π^- Induced Reactions at 1.15 GeV/c",
 M.L. Benabderrahmane *et al.*, T. Yamazaki (61 名中 61 番目),
 Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 182501
23. "Search for strange tribaryon states in the inclusive $4\text{He}(K^- \text{ stopped}, p)$ reaction",
 M. Sato *et al.*, T. Yamazaki, (26 番中 25 番)
 Phys. Lett. B **659** (2009) 107-112
- 〔学会発表〕(計 6 件)
1. 赤石義紀, Sajjad Marri, 山崎敏光
 ケイオン核 K^-pp の構造と生成スペクトル
 日本物理学会 2014 年春季大会
 2014 年 3 月 27 日、東海大学、平塚市
2. 赤石義紀
 Current theoretical topics on K^-pp quasi-bound states
 KEK 東海分室セミナー
 2014 年 3 月 5 日、KEK 東海、茨城県東海村
3. 赤石義紀
 K^-K^-pp as a doorway to multi-kaonic nuclear clusters
 北大核物理セミナー
 2013 年 5 月 28 日、北海道大学、札幌
- 他
- 〔図書〕(計 0 件)
- 〔産業財産権〕
 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
- 〔その他〕
 ホームページ等
6. 研究組織
- (1) 研究代表者 山崎 敏光
 (Toshimitsu Yamazaki)
 東京大学・理学系研究科・名誉教授
 研究者番号: 80011500
- (2) 研究分担者 赤石 義紀
 (Yoshinori Akaishi)
 日本大学・理工学部・客員教授
 研究者番号: 50001839
- (3) 連携研究者 ()