

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2005～2008

課題番号：17340068

研究課題名（和文） 高密度K中間子原子核の構造・生成・崩壊

研究課題名（英文） Structure, Formation and Decay of Dense Kaonic Nuclei

研究代表者

山崎 敏光 (YAMAZAKI TOSHIMITSU)

東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授

研究者番号：80011500

研究成果の概要（和文）：

K中間子原子核、特に最も基本的要素であるK-pおよびK-p pの構造・生成・崩壊に関する理論的研究が深められた。その結果、K中間子原子核を高密度に凝縮させる力は、核子間を回遊する実のK中間子が引き起こすハイトラー・ロンドンの共有結合力であることが明らかにされた。これは従来から知られている湯川中間子に媒介される通常の核力と全く異なるメカニズムによるもので、通常の4倍も強いので、超強核力と命名された。

最近カイラル理論に基づきK-p相互作用が弱く、そのエネルギーは1420 MeVにあるとの予言が広まっているが、その問題点について理論的研究がなされた。K-pの束縛状態がどこにあるかのデベートに決着をつける実験法が提案され、実行の準備が行われた。また、古い実験データの解析から、その束縛状態が1420 MeVではなく1405 MeVにあることが確認された。

高密度K-p p核はp+p衝突の中で大きな断面積で生成することが理論的に明らかにされた。それは3 GeVという高いエネルギーでの衝突における $\Lambda^*(1405)$ の生成は、大きな運動量移行により短距離でおきるので、 Λ^* の生成に関与するもう一個の陽子との距離は自動的に短くなり、高密度 $\Lambda^*p = K\text{-}pp$ が大量に生成するのである。そこで、この反応によるK-ppの実験的探索が行われた。DISTO実験で取得された陽子陽子衝突の古いデータをこの見地から解析した結果、束縛エネルギー103 MeV、幅120 MeVの状態が見つかり、その生成断面積の大きさから、予想どおりの高密度原子核が生成していることが判明した。

研究成果の概要（英文）：

Studies of the structure, formation and decay of kaonic nuclei, in particular, of the most basic K-p and K-pp, have been studied. The force that produces high-density kaonic nuclei is a new type of force, which originates from a large exchange attraction of Heitler-London type, caused by a migrating K⁻ between the two nucleons. Since this force is 4 times as strong as the ordinary nuclear force, we name it “super-strong nuclear force”.

Recently, chiral theories predict that the K-p state is located at 1420 MeV or above and that the K⁻-p interaction is weak, in great contrast to the presence of $\Lambda^*(1405)$. We point out problems in their predictions. Experimental methods to test this hypothesis have been proposed. A new analysis of old bubble chamber data on K⁻ absorption in ⁴He was made, which confirmed the Λ^* energy is 1405 MeV, not 1420 MeV.

It was shown that the predicted dense K-pp nucleus can be formed in p + p collision, where $\Lambda^*(1405) = K\text{-}p$ is produced in close proximity with the other participating proton, thus spontaneously forming K-pp at a very large sticking probability. Thus, its search in the p+p collision is in progress at GSI. Parallel to this effort, analysis of experimental results of p + p → K⁺ + Λ + p reaction at SATURNE-DISTO was

carried out. As predicted, a deeply bound and dense K-pp state with a K- binding energy of 103 MeV and a width of 120 MeV was found.

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	3,500,000	0	3,500,000
2006年度	3,200,000	0	3,200,000
2007年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
総計	12,800,000	1,830,000	14,630,000

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：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

異常高密度K中間子核の存在はわれわれによって2000年に行われ、それ以来、さまざまな実験的探索が行われたが決定的な証拠は得られていなかった。一方、理論的検討を進めるうちに、この研究が大きな歴史的意義をもつことが認識されはじめた。

1932年、Heisenbergは、核力の原因の説明を水素分子の結合になぞらえて、「回遊する電子の生み出す共有結合」のHeitler-London理論によって説明しようと試みたが不成功に終わった。これを超克したのが湯川の中間子論である。この「媒介する仮想粒子」により力が生ずるとの湯川の考えは、その後、核力ばかりでなく、電弱相互作用にまで及ぶ、現代物理学の根底に横たわる概念となっている。一方、この湯川理論の出現によって、Heitler-London-Heisenbergの考えは捨て去られてしまった。ところが最近われわれは、反K中間子が原子核を異常高密度に凝縮させることを理論的に見出した。これはいかなる核力によるものであるか？その理論的・実験的探求が求められている。

2. 研究の目的

本研究課題にうたうK中間子原子核は、反K中間子を構成子とする全く新しい原子核である。我々の理論的予言によれば、中間子と陽子の間の非常に強い引力により、負K中間子が陽子過剰の少数核子系に強く束縛され、通常核子密度の数倍に及ぶ高密度状態が生

成する。K束縛状態はエネルギーが低くなるため、主な崩壊モードへの崩壊が抑制され、離散的エネルギー状態となる。K中間子を複数個含む原子核も予言され、これを高エネルギー重イオン反応の中で探索するというアイデアが生まれた。そのようなK中間子核凝縮体は、期待されているマクロな系（ストレンジレットやストレンジ星）のミクロな原始形態である。この異常なK中間子原子核の実験的証拠は、いくつかの研究グループによって報告されているが、まだ確証はない。本研究の狙いは、われわれが育ててきた、K中間子原子核という新しいパラダイムを発展させ、その構造、生成、崩壊を多角的に研究することにある。理論面では、KN相互作用の強さの密度依存性（カイラル対称性の回復）、相対論的効果、核の圧縮性、クオークの自由度を含む構造の取り扱い、生成反応理論の構築など、興味ある問題がひしめいている。実験的研究としては、国外の研究施設で国際的共同研究を発展させ、近い将来、我が国のJ-PARCで展開させる基礎を築く。

3. 研究の方法

高密度K中間子核の構造・生成・崩壊の理論的研究から、もっとも基本的なK-pp核の生成法を理論的に予言すること、その実験的探索を提唱すること、である。

[K中間子核の生成反応の理論予測]

高エネルギー陽子による反応、重イオン反応中で発生するK中間子核の崩壊と同定に

関して実験に先立ち理論的シミュレーションを行う。すでにこの反応により K^-pp 束縛状態が強く生成することが予言されている。

[pp 反応での K^- 中間子核の発生と同定]

われわれは、高エネルギー pp 反応で生成する K^-pp 核を探索するため、ドイツ GSI 研究所の大立体角測定器 FOPI を用いる実験を同研究所に提案し、採択されているので、これを実施する。この予備的情報を得るため、過去に行われた DISTO 実験のデータがこの反応の探索に適することがわかったので、そのグループと共同で解析を進めることとした。

4. 研究成果

K^-pp 核の構造の理論的研究から強い凝集力のメカニズムが明らかにされた。それは K^- 中間子が核子間を回遊することによって生ずる一種の共有結合によるもので、これは湯川中間子のもたらす通常の核力の 4 倍ほどの大きさになる。これは K^- 中間子の存在によって初めて生ずる核力で、超強核力と命名された。その最も基本的な形態は K^-pp 原子核である。それを過去においてフランスサクレで行われた陽子陽子衝突実験のデータの中に見つけるというプロジェクトを推進し、ついにその状態が見出された。これは K^- 中間子の束縛エネルギー 103 MeV、幅 120 MeV であり、その生成断面積はわれわれの予言していたものと一致した。この事実から、これが探索していた K^-pp 核であり、その高密度性が証明された。

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)

[雑誌論文] (計 20 件)

1) T. Yamazaki, M. Maggiora, P. Kienle, K. Suzuki on behalf of the DISTO collaboration, Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 132502, Indication of a deeply bound and

compact K^-pp state formed in the $pp \rightarrow p$ ΛK^+ reaction at 2.85 GeV

2) J. Esmaili, Y. Akaishi and T. Yamazaki, ArXiv: 0909.2573v2, Resonant formation of $\Lambda(1405)$ by stopped- K^- absorption in deuteron.

3) T. Suzuki, J. Esmaili and Y. Akaishi, Proc. 19th Int. IUPAP Conf. on Few-Body Problems in Physics, The investigation of $\Lambda(1405)$ in the stopped K^- reaction on deuterium

4) J. Esmaili, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Lett. B 686 (2010) 23, Experimental confirmation of the $\Lambda(1405)$ ansatz from resonant formation of a K^-p quasi bound state in K^- absorption by ^3He and ^4He

5) Y. Akaishi, T. Yamazaki, M. Obu and M. Wada, Nucl. Phys. A 835 (2010) 67-74, Single pole nature of $\Lambda(1405)$ and structure of K^-pp

6) M. Maggiora, P. Kienle, K. Suzuki and T. Yamazaki on behalf of the DISTO collaboration, Nucl. Phys. A 835 (2010) 43-50, DISTO data on K^-pp

7) T. Yamazaki, P. Kienle, K. Suzuki, M. Maggiora on behalf of the DISTO collaboration, Hyperfine Interact 193 (2009) 181-187, First exclusive measurements of the K^-pp state populated in the $pp \rightarrow K^+ \Lambda p$ reaction at 2.85 GeV

8) Y. Akaishi and T. Yamazaki, Int. J. Mod. Phys. A 24 (2009) 2118-2125, Structure of K^-pp system and super-strong nuclear force by migrating K^- meson: Its theoretical background

9) 山崎敏光、赤石義紀、日本物理学会誌

{\bf 63} (2008) 707-710, 新しい高密度核凝集力 - K中間子の共有結合がつくる超強核力の世界

10) Y. Akaishi, Khin Swe Myint and T. Yamazaki, Proc. Jpn. Acad. B 84 (2008) 264-273, Kaonic nuclear systems $K\bar{K}N$ and $K\bar{K}NN$ as decaying states

11) T. Yamazaki, Prog. Theor. Phys. Suppl. {\bf 170} (2007) 138-160, The quest for pionic and kaonic nuclear bound systems following Yukawa and Tomonaga

12) T. Yamazaki and Y. Akaishi, Prog. Theor. Phys. Suppl. 168 (2007) 581-588, The fundamental kaonic nuclear cluster $K^-\bar{p}p$ - Its structure and formation

13) T. Yamazaki and Y. Akaishi, Phys. Rev. C 76 (2007) 045201-1-16, Basic $K\bar{K}N$ nuclear cluster, $K^-\bar{p}p$, and its enhanced formation in the $p+p \rightarrow K^++X$ reaction

14) T. Yamazaki and Y. Akaishi, Proc. Jpn. Acad. B 83 (2007) 144-150, Super strong nuclear force caused by migrating $K\bar{K}$ mesons - Revival of the Heitler-London-Heisenberg scheme in kaonic nuclear clusters

15) T. Yamazaki and Y. Akaishi, Nucl. Phys. A 792 (2007) 229-248, Emission spectra and invariant masses of Λ and p in the stopped- $K^-\bar{N}N$ absorption process in ^4He and ^6Li

16) T. Yamazaki and Y. Akaishi, ArXiv: nucl-th/0604049v1, Enhanced formation of a dense $K\bar{K}N$ nuclear cluster $K^-\bar{p}p$ in pp collisions - Λ^*p doorway dominance

17) P. Kienle, Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Lett. B 632 (2006) 187-191, Momentum correlation in the three-body decay of high-density $K\bar{K}N$ nuclear clusters: NNN

$K\bar{K}N \rightarrow N+N+\Lambda$

18) T. Yamazaki, Proceedings of EXA05 (2005) 23-33 (Stefan Meyer Institut, Vienna, February 21-25, 2005), Overview: Deeply bound nuclear states of pions and kaons

19) Y. Akaishi, Proceedings of EXA05 (2005) 45-53 (Stefan Meyer Institut, Vienna, February 21-25, 2005), Kaonic helium atoms in relation to kaonic nuclear bound states

20) Y. Akaishi, A. Dote and T. Yamazaki, Phys. Lett. B 613 (2005) 140-147, Strange tribaryons as $K\bar{K}$ -mediated dense nuclear systems

[学会発表] (計 5 件)

T. Yamazaki, First exclusive measurements of the $K^-\bar{p}p$ state populated in the $pp \rightarrow K^+\Lambda p$ reaction at 2.85 GeV, Int. Conf. Exotic Atoms and Nuclei (Vienna, September 15, 2008)

[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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 敏光 (YAMAZAKI TOSHIMITSU)
東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授
研究者番号：80011500

(2) 研究分担者

赤石 義紀 (AKAISHI YOSHINORI)
日本大学・理工学部・客員教授
研究者番号：50001839

(3) 連携研究者 なし