

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540305

研究課題名(和文) 2重荷電交換反応を用いた中性子ドリップライン近傍のラムダハイパー核研究

研究課題名(英文) Study of the Lambda hypernuclei close to the neutron drip-line by the double charge-exchange reaction

研究代表者

阪口 篤志 (Sakaguchi, Atsushi)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70205730

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ストレンジネスの自由度を持つラムダ・ハイペロンを原子核に埋め込んだ新奇な原子核「ラムダ・ハイパー核」の研究を行った。特に、中性子過剰なラムダ・ハイパー核を生成し、その核構造を研究するため、二重荷電交換反応を用いた研究手法を採用した。反応断面積が極めて小さい二重交換反応の測定に向け、大強度ハドロンビームを利用し、その測定に耐える粒子検出器の開発と改良を行った。中性子ドリップライン近傍の中性子過剰ラムダ・ハイパー核 ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ を探索する実験を J-PARC 50GeV 陽子シンクロトロン加速器施設にて実施した。

研究成果の概要(英文)：The subject of this research is a study of new nuclei 'Lambda hypernuclei' for which a Lambda hyperon, one of baryon with the strangeness degree of freedom, is embedded in nuclei. The double charge-exchange reaction is employed to create and study neutron-rich Lambda hypernuclei. One of difficulties in the measurement of the double charge-exchange reaction is the tiny reaction cross section. To override the difficulty, high-intensity hadron beams are used, and detectors are developed for the high beam rate environment. An experiment to search for the neutron-rich Lambda hypernucleus ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ close to the neutron drip-line was performed at the J-PARC 50GeV Proton Synchrotron Accelerator facility.

研究分野：実験核物理

キーワード：中性子過剰ラムダ・ハイパー核 二重荷電交換反応 中性子ドリップライン 大強度中間子ビーム

1. 研究開始当初の背景

原子核は陽子・中性子から成ることが知られている。一方で、陽子・中性子が含まれるバリオンの仲間には、陽子・中性子以外に多種多様の粒子がある。そのバリオンの中で、陽子・中性子に次いで質量の軽いバリオンにハイペロンと呼ばれる粒子群がある(ラムダ、シグマ、グザイ、オメガ粒子)。原子核中の陽子・中性子をこれらハイペロンで置き換えた新奇な原子核「ハイパー核」の生成が実験的に可能である。特に、ハイペロンの中で最も質量が軽いラムダ・ハイペロンを原子核に埋め込んだラムダ・ハイパー核については、実験および理論の両面から多くの研究が進んでいる。

ラムダ粒子、陽子、中性子から成るラムダ・ハイパー核という少数多体系の性質を議論するには、ラムダ・ハイペロンと陽子・中性子の相互作用(ΛN 相互作用)が重要な役割を果たす。この ΛN 相互作用は、陽子・中性子間の相互作用(NN相互作用)と同様に、引力的な相互作用であることが知られている。このためラムダ・ハイペロンは通常の原子核をより強固に結合する糊的な役割を果たし、粒子崩壊に対して安定なラムダ・ハイパー核の同位体数は、通常の原子核の安定同位体の数を上回ることが理論的に予想されている。

このように、ラムダ・ハイパー核には多様な安定同位体が存在すると考えられるが、これまでのところ、そのごく一部のラムダ・ハイパー核のみが実験により成功裏に生成されている。これは、ラムダ・ハイパー核の確立された生成手法が非常に限られていることに起因している。

2. 研究の目的

上に述べたように、これまでの実験的研究で生成されたラムダ・ハイパー核の同位体は非常に限られたものである。この一因は、これまでラムダ・ハイパー核生成に用いられてきたハドロン反応が、原子核を標的とした(K^-, π^-)反応(ストレンジネス移行反応)と(π^+, K^+)反応(ストレンジネス・反ストレンジネス対生成反応)が主であったためである。これらは、中性子(電荷なし)をラムダ粒子(電荷なし)に変える反応であり、標的原子核の陽子・中性子比を大きくは変えない。このため、原子核図表で言うところの安定ラインに近いラムダ・ハイパー核の同位体のみが生成可能であった。ラムダ・ハイペロンの糊的効果は、陽子および中性子ドリップ・ライン近傍で、その効果がラムダ・ハイパー核の安定性に劇的に寄与すると考えられるが、その領域にアクセスする実験手法が確立できていないのが現状である。

この状況を打開するため、本研究では二重荷電交換反応(Double-Charge-eXchange 反応、DCX 反応)を用いたラムダ・ハイパー核生成手法の研究を行った。ハドロンビームを

用いた DCX 反応の候補としては、(K^-, π^+)反応、(π^-, K^+)反応が考えられる。両反応とも、原子核中の陽子2個(合計2eの電荷)をラムダ粒子と中性子(電荷なし)に変換する。このため、二重荷電交換反応を用いれば、陽子と中性子の比率が中性子側に偏った、中性子過剰ラムダ・ハイパー核の生成が可能となり、物理的に興味深い中性子ドリップ・ライン近傍のラムダ・ハイパー核の生成も原理的に可能となる。

もう一つの興味ある現象として、ラムダ・ハイパー核中で、ラムダ核子の対(ΛN)がシグマ核子の対(ΣN)と量子力学的混合を起こす効果がある(ΛN - ΣN 混合)。これと同等の現象は通常の原子核でもあるものの、混合の程度が小さく顕著な効果を生まないが、ラムダ・ハイパー核では実験的に検証できる程度の大きな効果が期待されている。実際に、質量数4のラムダ・ハイパー核($^4_\Lambda H$ と $^4_\Lambda He$)では、この ΛN - ΣN 混合効果により、基底状態の結合エネルギーに1 MeV前後の引力的寄与があるという理論的な示唆がある。また、この ΛN - ΣN 混合効果は、陽子と中性子の数がアンバランスなドリップ・ライン近傍のラムダ・ハイパー核でより顕著になるという理論予想があり、中性子過剰ラムダ・ハイパー核の研究でそれを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、上に述べた二重荷電交換反応のうち(π^-, K^+)反応を用いた研究を行う。これまでの実験的研究により、この反応の断面積は非常に小さく、従来用いられてきた(π^+, K^+)反応の断面積の約1/1000(10 nb/sr程度)と考えられている。これを克服するため、従来にない高強度の π ビームを利用した実験が必要である。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、大強度陽子が加速できる50 GeV陽子シンクロトロン実験施設(J-PARC 50 GeV PS)があり、この大強度陽子ビームにより高強度 π ビームを生成し実験に利用できる(K1.8ビームライン)。本研究では、このJ-PARC 50 GeV PSの大強度 π ビームを利用した。

本研究で用いる(π^-, K^+)反応の測定には、 π^- を同定し運動量を測定するスペクトロメータ(K1.8ビームライン・スペクトロメータ)と K^+ を同定し運動量を測定するスペクトロメータ(SKsスペクトロメータ)を利用した。図1に両スペクトロメータの概念図を示す。スペクトロメータの基本的な粒子識別と飛跡検出の測定器は既に開発済みのものを利用したが、二重荷電交換反応の測定のため、次に挙げる改良を行った。

① 高強度の π ビームに耐える飛跡検出器として、シンチレーション・ファイバーをシリコンPMTで読み出す飛跡検出器(BFT、SFT)を開発し、両スペクトロメータに組み込んだ。

- ② プラスチック・シンチレーション・トリガー検出器 (BH2) を新たな設計に更新し、高強度の π ビームに耐えるようにした。
- ③ (π^- , K^+) 反応の反応点を正確に決定するため、標的 (Target) 直後の SFT に加えて標的直前にシリコン・ストリップ検出器 (SSD) を導入した。

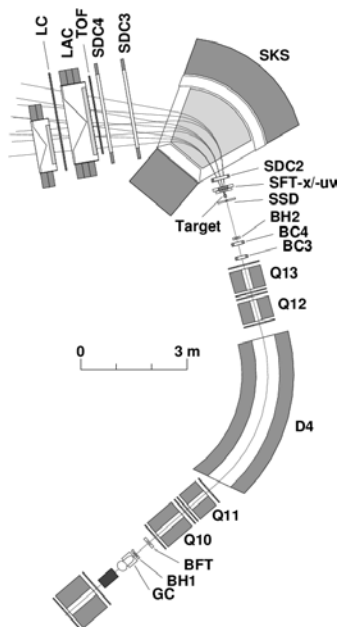


図 1 : 実験に使用したスペクトロメータの概念図。K1.8 ビームライン・スペクトロメータ (下部) と SKS スペクトロメータ (上部) から成る。

J-PARC 50 GeV PS にて本研究を実施するため、 ${}^6\text{Li}$ および ${}^9\text{Be}$ を標的とし、中性子が過剰なラムダ・ハイパー核 ${}^6_\Lambda\text{H}$ および ${}^9_\Lambda\text{He}$ を二重荷電交換反応により生成する実験提案を J-PARC 実験課題審査委員会に提出し、実験課題 (J-PARC E10 実験) として既に採択されていた。この J-PARC E10 実験のうち、 ${}^6\text{Li}$ を標的とする実験を、平成 24 年 12 月から平成 25 年 1 月にかけて成功裏に実施した。

実験データの解析は、大阪大学に整備した解析環境、および、高エネルギー加速器研究機構のデータ解析センター (KEKCC) の計算機資源を利用することで効率的に行った。なお、実験データと解析中間データの保管は、データ保全のため大阪大学および KEKCC にて二重に行っている。

4. 研究成果

(1) 測定器の開発・改良

本研究では、高強度の π ビームを活用することで、反応断面積の小さな二重荷電交換反応の測定を行った。それに向けた検出器開発の成果を以下にまとめる。

- ① 直径 0.5 から 1 mm のシンチレーション・ファイバーをシリコン PMT (Hamamatsu

Photonics 社製 MPPC) で読み出す形式の飛跡検出器として BFT と SFT を開発し実験に使用した (図 2)。J-PARC 50GeV PS の K1.8 ビームラインにおける実験では、平均 10 MHz (最大 40 MHz) の高強度 π ビームが BFT と SFT を通過し、その環境でも飛跡検出の効率が BFT に対して 97% 以上、SFT-SDC2 の組み合わせで 92% 以上が達成できた。また、時間特性のよいシンチレーション・ファイバーとシリコン PMT の組み合わせにより、 π ビームの通過時間の分解能 1.2 ns (rms) が得られ、実験データ解析の際 3 ns の厳しい時間制限をかけることで、バックグラウンド事象が低減できた

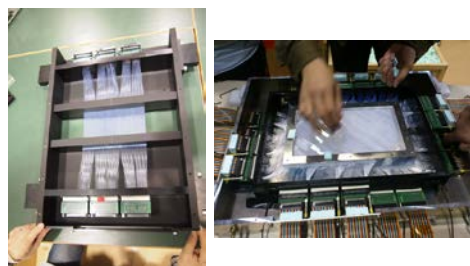


図 2 : J-PARC E10 実験で新たに導入された、シンチレーション・ファイバー飛跡検出器 BFT (左) と SFT (右)。

- ② トリガー検出器として用いたシンチレーション・ホドスコープ検出器 BH2 は、高強度の π ビームに対するレート耐性を向上するため、ビームの空間分布に合わせたシンチレータ分割サイズの最適化を行い、PMT も高速タイプ (Hamamatsu R9880U-110MOD) に交換した (図 3)。これにより、低ビーム・レートの時間分解能約 80 ps (rms) からはビーム・レートの増加に伴い分解能の悪化が見られるものの、40 MHz の最大ビーム・レートにおいても、200 ps (rms) の時間分解能が維持でき、SKS スペクトロメータにおける K^+ 粒子識別のバックグラウンド軽減に貢献した。

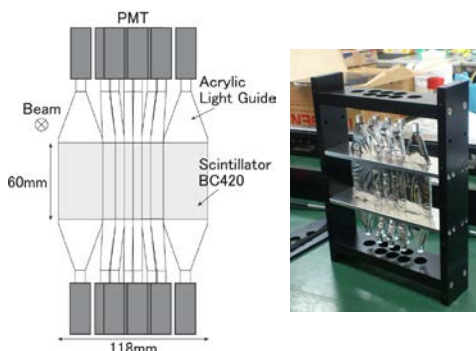


図 3 : 改良後のシンチレーション・ホドスコープ検出器 BH2 の概念図 (左) と検出器組み立て中の写真 (右)。

- ③ 標的中のエネルギー損失を正確に評価

するためには、 (π^-, K^+) 反応の反応点を精密に求める必要がある。標的の下流の K^+ の飛跡再構成の精度は SFT-SDC2 で十分に得られる。標的上流の π^- の飛跡をより正確に再構成する必要から、新たにシリコン・ストリップ検出器 (SSD) を導入した (図4)。標的での反応と、それ以外の物質で起こる反応の分別が容易になり、バックグラウンド事象の低減につながった。

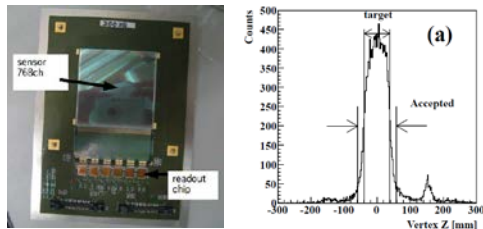


図4：シリコン・ストリップ検出器 (左) と飛跡再構成により得られた反応点分布 (右)。

(2) J-PARC E10 実験

${}^6\text{Li}$ を標的とした ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応の測定の解析を大阪大学に整備した解析環境と KEKCC を利用して行った。これらの計算機資源を利用し、またこれまでに整備されていた解析ソフトウェアを改良することで、各検出器の解析パラメータの調整を全てのデータ・セット毎に行った。その後、各スペクトロメータでの飛跡再構成と運動量再構成を行い、最終解析用のデータ・セットを作成した。

運動量再構成の精度は、missing-mass 較正用に取り得た ${}^{12}\text{C}(\pi^-, K^+){}^{12}\text{C}$ 反応の励起エネルギー・スペクトラムから見積もった (図5)。 ${}^{12}\text{C}$ の基底状態生成のピーク (s_Λ) が明確に観測され、missing-mass 分解能として $3.2 \text{ MeV}/c^2$ (FWHM) の値を見積もった。これと同等の分解能が (π^-, K^+) 反応でも期待され、中性子過剰ラムダ・ハイパー核探索に十分な分解能が得られることが確認できた。

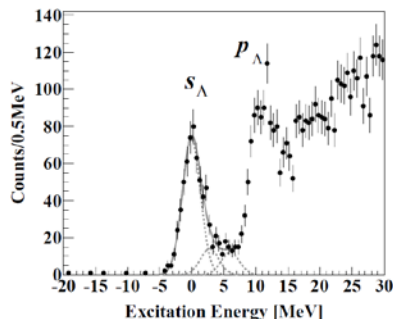


図5： ${}^{12}\text{C}(\pi^-, K^+){}^{12}\text{C}$ 反応の励起エネルギー・スペクトラム。基底状態 (s_Λ) と励起状態 (p_Λ) 生成のピークが観測された。

両スペクトロメータの運動量較正は、0.8、0.9、1.0 と 1.2 GeV/c のビーム運動量で実施されたビーム・スルー・ランの実験データ

と、1.37 GeV/c のビーム運動量で実施された ${}^1\text{H}(\pi^+, K^+)\Sigma^+$ 反応の実験データを用いて行った。また、運動量較正の系統誤差は 1.32 MeV/c と見積もられた。

最終的に得られた ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)X$ 反応の missing-mass スペクトラムを図6に示す。中性子過剰な ${}^6_\Lambda\text{H}$ ラムダ・ハイパー核生成に対応する missing-mass $5800 \text{ MeV}/c^2$ の領域には明確なピーク構造は見られず、中性子過剰ラムダ・ハイパー核の生成断面積の上限値として $1.2 \text{ nb}/\text{sr}$ (90% C.L.) が得られた。この値は、予想していた生成断面積 $10 \text{ nb}/\text{sr}$ に比べ約 1桁小さい値であった。 ${}^6_\Lambda\text{H}$ は ${}^4_\Lambda\text{H}+2n$ の構造を持つと考えられているため、この系での ΛN - ΣN 混合効果が期待したほど大きくないことを示唆する結果となったが、実験結果の解釈について理論研究者を交え詳細な検討を行った。

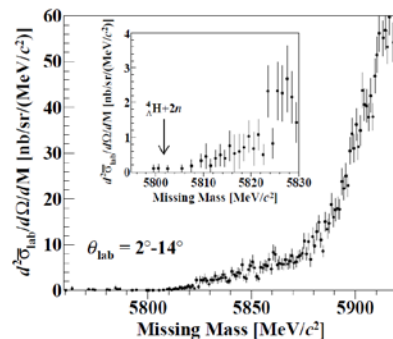


図6： ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)X$ 反応の missing-mass スペクトラム。挿入図は ${}^4_\Lambda\text{H}+2n$ への粒子崩壊の閾値付近を拡大したもの。

中性子過剰ラムダ・ハイパー核の核構造から ΛN - ΣN 混合効果に関するより正確な情報を得るためには、J-PARC E10 実験の2つ目の研究対象である ${}^9_\Lambda\text{He}$ の生成実験を行う必要がある。この実験は J-PARC 50GeV PS で十分な実験時間が得られず未実施であるが、二重荷電交換反応測定のための技術的問題点はこれまでの研究で解決されており、 ${}^9_\Lambda\text{He}$ 生成実験実施の準備は完了した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 12 件)

- ① Yudai Ichikawa, Atsushi Sakaguchi et al., Observation of the “ K^*pp ”-like structure in the $d(\pi^+, K^+)$ reaction at 1.69 GeV/c, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2015, 2015, 021D01(1-8)
DOI: 10.1093/ptep/ptv002
- ② Yudai Ichikawa, Atsushi Sakaguchi et al., Inclusive spectrum of the $d(\pi^+, K^+)$ reaction at 1.69 GeV/c, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読あり, 2014, 2014, 101D03(1-8)
DOI: 10.1093/ptep/ptu128
- ③ M. Moritsu, S. Ajimura, A. Sakaguchi et

- al., High-resolution search for the Θ^+ pentaquark via a pion-induced reaction at J-PARC, Physical Review C, 査読あり, 90, 2014, 035205(1-11)
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.035205
- ④ H. Sugimura, S. Ajimura, T. Fukuda, Y. Mizoi, A. Sakaguchi et al., Search for ${}^6\Lambda\text{H}$ hypernuclei by the (π, K^+) reaction at $p(\pi)=1.2$ GeV/c, Physics Letters B, 査読あり, 729, 2014, 39-44
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.12.062
- ⑤ M. Naruki, S. Ajimura, A. Sakaguchi et al., Search for Pentaquark Θ^+ in Hadronic Reaction at J-PARC, Few-Body Systems, 査読あり, 54, 2013, 955-960
DOI: 10.1007/s00601-013-0685-2
- ⑥ H. Sugimura, S. Ajimura, T. Fukuda, Y. Mizoi, A. Sakaguchi et al., Study of Neutron-Rich Hypernuclei by the (π, K^+) Reaction at J-PARC, Few-Body Systems, 査読あり, 54, 2013, 1235-1238
DOI: 10.1007/s00601-013-0655-8
- ⑦ T. Kishimoto, F. Khanam, S. Ajimura, A. Sakaguchi, T. Fukuda, Y. Mizoi et al., Search for a bound kaon and pion state, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読あり, 2013, 2013, 041C01(1-6)
DOI: 10.1093/ptep/ptt003
- ⑧ M. Moritsu, S. Ajimura, A. Sakaguchi et al., Search for Θ^+ at J-PARC, Nuclear Physics A, 査読あり, 914, 2013, 91-96
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.01.010
- ⑨ C. Rappold, E. Kim, D. Nakajima, T.R. Saito, S. Ajimura, T. Fukuda, A. Sakaguchi et al., Hypernuclear spectroscopy of products from ${}^6\text{Li}$ particles on a carbon target at 2AGeV, Nuclear Physics A, 査読あり, 913, 2013, 170-184
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.05.019
- ⑩ T.R. Saito, D. Nakajima, S. Ajimura, T. Fukuda, Y. Mizoi, A. Sakaguchi et al., Production of hypernuclei in peripheral HI collisions: The HypHI project at GSI, Nuclear Physics A, 査読あり, 881, 2012, 218-227
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2012.02.011
- ⑪ K. Shirotori, T.N. Takahashi, S. Ajimura, A. Sakaguchi et al., Search for the Θ^+ pentaquark via the $\pi^-p \rightarrow K^X$ reaction at 1.92 GeV/c, Physical Review Letters, 査読あり, 109, 2012, 132002(1-5)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.132002
- ⑫ Toshiyuki Takahashi, Atsushi Sakaguchi, et al., Beam and SKS spectrometers at the K1.8 beam line, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読あり, 2012,

2012, 02B010(1-16)
DOI: 10.1093/ptep/pts023

[学会発表] (計 5件)

- ① Atsushi Sakaguchi, Neutron-rich Lambda Hypernuclei, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, 4 October 2014, Hawaii, USA
- ② A. Sakaguchi, E10 experiment on neutron-rich hypernuclei, KEK theory center workshop on J-PARC hadron physics, 10 February 2014, Ibaraki, Japan
- ③ A. Sakaguchi, Study of Lambda hypernuclei close to neutron drip-line, International Conference on Nuclear Fragmentation 2013 (NUFRA2013), 4 October 2013, Kemer, Turkey
- ④ A. Sakaguchi, Study of Lambda hypernuclei close to neutron drip-line, The 2nd Korea-Japan Workshop on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC, 24 September 2012, Pusan, Korea
- ⑤ A. Sakaguchi, Production of Lambda Hypernuclei close to neutron drip-line, International Workshop on Strangeness Nuclear Physics 2012 (SNP12), 27 August 2012, Osaka, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://wwwkm.phys.sci.osaka-u.ac.jp/j-parc-E10-E22/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪口 篤志 (SAKAGUCHI, Atsushi)
大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70205730

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

福田 共和 (FUKUDA, Tomokazu)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：50116092

味村 周平 (AJIMURA, Shuhei)
大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号：10273575

溝井 浩 (MIZOI, Yutaka)
大阪電気通信大学・工学部・講師
研究者番号：30388392