

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400287

研究課題名(和文) ダブルメソン光生成反応による高励起バリオンの研究

研究課題名(英文) Study of highly excited baryon resonances via double meson photoproduction

研究代表者

石川 貴嗣 (ISHIKAWA, Takatsugu)

東北大学・電子光物理学研究センター・助教

研究者番号：40400220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：メソンを二つ生成する光反応を測定し、中間状態として現れる高励起バリオンやダイバリオン状態について調べた。メソン一つの生成反応では調べられない高励起バリオンの分光を核子標的での荷電パイオンと中性パイオンの同時生成で調べ、メソンと核子に結合するバリオンを明らかにし、国際会議で報告した。ダイバリオンは二核子あるいは空間的にコンパクトな6クォーク状態のオブジェクトとして興味深い対象である。重陽子標的での二つの中性パイオンの同時生成反応を測定し、 $\Delta$ の準束縛状態に対する断面積は学術雑誌のレターで報告した。また  $N^*$ 状態と目されるピークが観測でき、国際会議での報告を予定している。

研究成果の概要(英文)：Highly-excited baryons and dibaryons have been experimentally studied via double meson photoproduction. Baryon resonances which hardly couple to a single meson and nucleon are investigated using simultaneous photoproduction of the charged and neutral pions. We have found baryons coupling to a rho meson and nucleon, and the details of them were reported at an international conference. The dibaryon state is of interest, which can be a molecule consisting of two baryons or a spatially compact hexaquark object. Coherent double neutral-pion photoproduction on the deuteron was investigated. The cross section for photoproduction of the isoscalar double Delta quasi bound state was reported as a letter in a scientific journal. We have also found a Delta and nucleon quasi-bound state candidate, which will be reported at an international conference and published in a scientific journal in this fiscal year.

研究分野：ハドロン物理(実験)

キーワード：ハドロン物理 光生成反応 ダイバリオン バリオン分光

1. 研究開始当初の背景

(1)クォークの多体系であるメソンやバリオンといったハドロンを記述する内部自由度が何であるかはよくわかっていない。少なくとも構成子クォークのみ記述できないことはほぼ明らかであり、ダイクォーク相関やハドロンクラスターなどが提唱されてきている。これは量子色力学 QCD の相互作用を与えるラグランジアンがわかっているにも関わらず、ハドロンが相互作用の主役となる低エネルギースケールで結合定数が極端に大きくなり、QCD が織りなす現象を摂動計算で与えることができないことによる。そのため低エネルギーでの QCD の振る舞いを与える指標は、スピン、パリティが特定されたバリオンごとに整理された質量や幅といった性質であり、バリオン分光が重要な実験的なアプローチとなる。

(2) メソンと核子の弾性散乱から様々なバリオン共鳴が発見され、近年ではメソン光生成でもバリオン分光が行われるようになった。これまでのバリオン分光は、ほとんど全て陽子標的でのシングルメソン生成反応を使って行われてきた、と言える。高励起状態のバリオン共鳴では、 $N$ と言ったシングルメソンと核子に崩壊する分岐比は小さくなり、 $N$ と言ったダブルメソンと核子への崩壊過程が支配的となる。シングルメソン生成反応は高励起バリオンの研究には適さず、質量 1.7 GeV 以上で確立された核子共鳴、デルタ共鳴がほとんどない。ダブルメソン生成反応のデータを取得するためには大立体角の検出器が不可欠である。

2. 研究の目的

(1)新たにダブルメソン光生成反応の二重微分断面積を測定し、高励起状態の核子共鳴、デルタ共鳴の存在の特定と性質の解明を行う。確立されたバリオン共鳴のスペクトルは、低エネルギーでの QCD の振る舞いへの理解を深めるのに非常に重要な情報となる。

(2) ダイバリオンは二核子あるいは空間的にコンパクトな 6 クォーク状態のオブジェクトとして興味深い対象である。近年 CELESIUS/WASA や WASA-at-COSY により pn 衝突反応で観測された  $d^*(2380)$ 共鳴は、Dyson-Xuong によって予言された準束縛状態である D03 (スピン 3、アイソスピン 0)と目されている。この D03 が光生成でも見られるかを確かめる。また  $N$ 準束縛状態として D12(スピン 2、アイソスピン 1)を探索する

3. 研究の方法

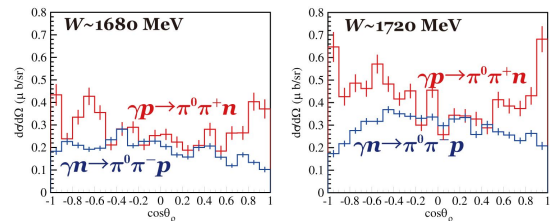
(1)ELPH で建設した大立体電磁カロリメータ FOREST を使って、2008 年からメソン光生成反応のデータ収集を行ってきた。大立体角の FOREST は  $0^0$ ,  $0^+$ 同時光生成といった反応過程の解析を可能にし、その二重微分断面積や全断面積から関与する

バリオン共鳴を明らかにすることが期待される。

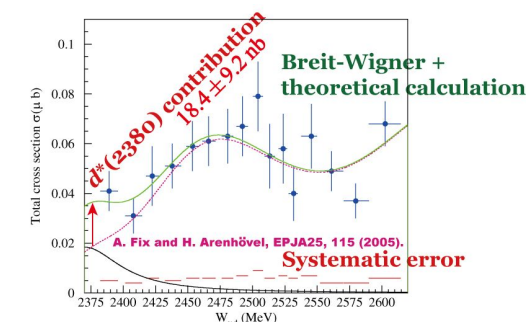
(2) ダブルメソン光生成反応の研究には大立体角検出器とこの検出器の性能や反応のアクセプタンスを詳細に調べることが重要となる。特に  $p^0+n$  反応は、中性子に対する検出効率をきちんと調べることで反応の解析が可能となる。中性子の検出効率については、実際に取得した中性子以外の終状態粒子をすべて検出し、 $p^0+n$  反応と同定できたイベントを解析して調べた。

4. 研究成果

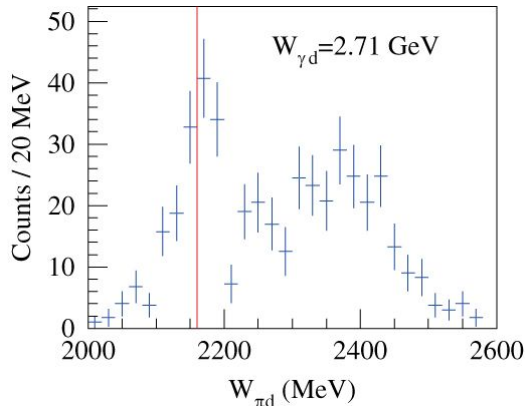
(1)  $N^*0_{\pm}N$  反応のデータを解析し、 $\pm N$  と結合するバリオン共鳴を調べた。 $0_{\pm}$  不変質量分布で  $\pm$  に対応する質量にエンハンスが見られており、重陽子中の陽子と中性子に対する反応 ( $p^*0+n$  と  $n^*0-p$ )で、重心系での  $\pm$ の角分布は、下に凸と上に凸で正反対の挙動を示している。陽子標的の全断面積についても導出したが、入射光子ビームのエネルギー 0.8 GeV 以上では世界初のデータとなっている。これらについて国際会議 INPC2016 で発表した。



(2)  $d^*0^0d$  反応のデータを解析し、その  $d^*(2380)$ 光生成に対する全断面積を導出した。東北大学電子光理学研究センターで 0.57 ~ 0.88 GeV の標識化光子ビームを使って測定したデータを使って、コヒーレントな重陽子標的での  $0^0$  光生成反応の全断面積を導出した。標識化光子ビームのエネルギーは  $d$  重心系のエネルギーにして 2.38 から 2.61 GeV を覆っていることになる。 $d^*(2380)$ 全域を覆ってはいないが、共鳴の半分は観測可能である。ダイバリオンを取り入れていない  $d^*0^0d$  反応の全面積に対する理論計算を用いて、ダイバリオンに対する全断面積を評価し  $18.4 \pm 9.2$  nb を得た。学術雑誌 Physics Letters B に掲載が確定し、現在印刷中である。

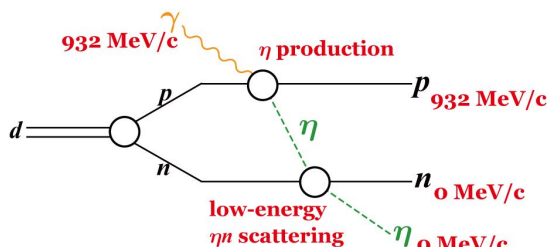


(3) 0.74 ~ 1.15 GeV の標識化光子ビームを使



って測定した  $d \rightarrow d \pi^0 \pi^0$  反応では  $\pi^0 \pi^0$  不変質量分布に 2.15 GeV 程度のピークが観測され、 $N$  準束縛状態  $D_{12}$  に対応するものと思われる。このピークの性質について詳細に調べており、プリリミナリーな結果では  $\pi^0$  と  $d$  の軌道角運動量は  $L=1$  であることが示唆されている。このことからパリティが  $+1$  と  $-1$  の両方に対応され、 $D_{12}$  と無矛盾である。国際会議 Hadron 2017 で発表する予定である。

(4) バリオン分光と同時にハドロン間相互作用もまた低エネルギーでの QCD の振る舞いへの理解を深めるのに非常に重要な情報となる。本研究を推敲する上で光子ビームを使った反応は中性ハドロン間の相互作用を決定するのに最適であることがわかった。特に  $N$  相互作用については、低エネルギー散乱パラメータである散乱長の虚部はだいたいわかっているが、実部については引力であるという以外にほとんどわかっていない。 $N$  相互作用の散乱長は基礎パラメータと言うだけでなく、核子のカイラルパートナー  $S_{11}$  核子共鳴の性質を明らかにする上でも非常に重要である。940 MeV の光子ビームを使って、 $d \rightarrow p n$  反応の陽子を超前方で検出することで、 $n$  の相対運動量  $0$  の状態を作り上げることができ、 $n$  の相互作用のパラメータ決定に最適であることがわかった。この実験の準備を行うと共に、その有用性を国際会議 MeNu で発表を行った。これに基づきシンポジウムでの講演 (ヤゲロニアン大学シ



ンポジウム 2017 年 6 月ポーランド・クラクフ) に招待されている。

## 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47件)

T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, Q. He, Y. Honda, T. Iwata, S. Kaida, H. Kanda, J. Kasagi, A. Kawano, S. Kuwasaki, K. Maeda, S. Masumoto, M. Miyabe, F. Miyahara, K. Mochizuki, N. Muramatsu, A. Nakamura, K. Nawa, S. Ogushi, Y. Okada, K. Okamura, Y. Onodera, K. Ozawa, Y. Sakamoto, M. Sato, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, Y. Tajima, Y. Taniguchi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, R. Yamazaki, H.Y. Yoshida, First measurement of coherent double neutral-pion photoproduction on the deuteron at the incident energy below 0.9 GeV, Physics Letters B、査読有、印刷中 DOI: 10.1016/j.physletb.2017.04.010

Q. He, J. Ai, T. Ishikawa, T. Li, L. Ma, M. Miyabe, N. Muramatsu, H. Shimizu, Y. Tsuchikawa, Y. Xiang, H. Yamazaki, Y. Zhang, A study of event mixing for Bose-Einstein correlations in the  $p \rightarrow p \pi^0 \pi^0$  reaction, Progress of Theoretical and Experimental Physics、査読有、2017 巻、2017、033D02-1 - 033D02-9 DOI: 10.1093/ptep/ptx013

Q. He, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, Y. Honda, T. Ishikawa, T. Iwata, S. Kaida, J. Kasagi, A. Kawano, S. Kuwasaki, K. Maeda, S. Masumoto, M. Miyabe, F. Miyahara, K. Mochizuki, N. Muramatsu, A. Nakamura, K. Nawa, S. Ogushi, Y. Okada, Y. Onodera, K. Ozawa, Y. Sakamoto, M. Sato, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, Y. Tajima, Y. Taniguchi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, R. Yamazaki, H.Y. Yoshida,

An event mixing technique for Bose-Einstein correlations of two pions in photoproduction around 1 GeV、Chinese Physics C、査読有、40 巻、2016、114002-1 - 114002-8

DOI: 10.1088/1674-1137/40/11/114002

T. Ishikawa, H. Fujimura, D.N. Grigoriev, R. Hashimoto, S. Kaida, R. Kitazawa, G.N. Kuznetsov, A. Nakamura, H. Shimizu, K. Suzuki, S. Takahashi, Y. Tsuchikawa, Ya.V. Vasiliev, H. Yamazaki、Testing a prototype BGO calorimeter with 100-800 MeV positron beams、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A、査読有、837 巻、2016、109 - 122

DOI: 10.1016/j.nima.2016.09.009

T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, T. Ishida, S. Kaida, J. Kasagi, A. Kawano, S. Kuwasaki, K. Maeda, F. Miyahara, K. Mochizuki, T. Nakabayashi, A. Nakamura, K. Nawa, S. Ogushi, Y. Okada, K. Okamura, Y. Onodera, Y. Saito, Y. Sakamoto, M. Sato, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, S. Takahashi, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki, H. Yonemura、The FOREST detector for meson photoproduction experiments at ELPH、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A、査読有、832 巻、2016、108 - 143

DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.054

T. Ishikawa, H. Fujimura, R. Hamano, R. Hashimoto, Y. Honda, T. Ishida, S. Kaida, H. Kanda, S. Kido,

Y. Matsumura, M. Miyabe, K. Mizutani, I. Nagasawa, A. Nakamura, K. Nanbu, K. Nawa, S. Ogushi, H. Shimizu, H. Sugai, K. Suzuki, K. Takahashi, S. Takahashi, Y. Taniguchi, A.O. Tokiyasu, Y. Tsuchikawa, H. Yamazaki、A fast profile monitor with scintillating fiber hodoscopes for high-intensity photon beam、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A、査読有、811 巻、2016、124 - 132

DOI: 10.1016/j.nima.2015.12.027

[学会発表](計19件)

T. Ishikawa、n scattering length from  $d(p,n)$  at  $E \sim 0.93$  GeV、The international symposium on Neutron Star Matter 2016 (NSMAT2016)、Tohoku University, Sendai, (Japan)、November 21--24, 2016

T. Ishikawa、Development of a high-intensity photon-beam profile monitor、IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference、Strasbourg, (France)、October 29 ~ November 5, 2016 (基調講演)

T. Ishikawa、Study of baryon resonances and meson-nucleon interactions using photoproduction reactions at ELPH、2016 JAEA/ASRC Reimei Workshop: New exotic hadron matter at J-PARC、Incheon, (Korea)、October 24 ~ 26, 2016 (招待講演)

T. Ishikawa、Simultaneous Photo-production Of Neutral And Charged Pions On The Deuteron At ELPH、The 26th International Nuclear Physics

Conference (INPC)、Adelaide, (Australia)、  
September 11--16, 2016

T. Ishikawa, n Scattering Length  
from the d p n Reaction at E ~ 0.9  
GeV、14th International Conference on  
Meson-Nucleon Physics and the Structure  
of the Nucleon (MENU2016)、Kyoto  
University, Kyoto, (Japan)、July 25--30,  
2016

T. Ishikawa, Meson photoproduction  
experiments at ELPH, Tohoku University、  
The 10th International Workshop on the  
Physics of Excited Nucleons (NSTAR2015)、  
Osaka University, Suita, (Japan)、May  
25-28, 2015 (基調講演・招待講演)

〔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

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/~hadron/mbr/ishikawa/004j.html>

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/~hadron/mbr/ishikawa/005j.html>

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/~hadron/mbr/ishikawa/006j.html>

<http://www.lns.tohoku.ac.jp/~hadron/mbr/ishikawa/007j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 貴嗣 (ISHIKAWA, Takatsugu) 助教  
東北大学・電子光理学研究センター  
研究者番号：40400220

(2)研究分担者

(3)連携研究者

(4)研究協力者