

令和 4 年 9 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01902

研究課題名(和文)光子ビームによるエキゾチックな6クォーク粒子「ダイバリオン」の研究

研究課題名(英文) Photoproduction of exotic six-quark dibaryon states

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) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：クォークの複合粒子であるハドロンは、3つのクォークからなるバリオン、クォークと反クォークからなるメソンに分類されてきた。ハドロンの内部構造と相互作用が非摂動領域の強い力の基礎理論たる量子色力学を解明する鍵である。光子ビームを重水素標的に照射し、終状態に2つの中性メソンと重陽子を見出す反応を実験的に調べた。2つの中性パイオン、あるいは中性パイオンとエータメソンの生成反応の断面積測定で、複数の2バリオンの共鳴状態(ダイバリオン)を観測し、質量、幅の決定とスピンパリティの推定を行った。これらのダイバリオンは重陽子の励起状態であり、新たな形態のハドロンと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、コヒーレントダブルメソン光生成反応でダイバリオンという6つのクォークから構成されるハドロンの観測に成功した。新たなハドロンの形態であるダイバリオンを観測したことで、クォークが単独では取り出せないという閉じ込め問題に新たな知見を与える。我々が発見したダイバリオンの一部がドイツ・ボン大学のELSA施設で追認されたり、反応計算を行う理論研究者も現れ始めたり、ダイバリオンの分光という新たな分野を切り拓いた。またダイバリオンの構造に対する理解は、未だよく理解されていない核物質の状態方程式や中性子星の内部構造に対して極めて重要な情報をもたらす。

研究成果の概要(英文)：Hadrons are composite particles of several quarks, and they are classified into two: three quark baryons and quark-antiquark mesons. The structure and interaction of hadrons provides crucial insight into the non-perturbative mechanisms in quantum chromodynamics. We have experimentally studied coherent photoproduction of double neutral mesons on the deuteron at incident photon energies below 1.2 GeV. We have measured the total and differential cross sections for two neutral-pion production and neutral-pion and eta meson production, observing several two-baryon resonance (dibaryon) states. We have succeeded to observe several dibaryon states or excited states of the deuteron, belonging to a new type of hadrons.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：ダイバリオン コヒーレント光生成反応 ハドロン分光

1. 研究開始当初の背景

強い力で相互作用する「ハドロン」は、クォーク・グルーオンの複合粒子であり、強い力の基礎理論自体は量子色力学 quantum chromodynamics (QCD)として確立されている。本来、ハドロンの構造や相互作用は、QCD をもとにクォーク・グルーオンの自由度で記述できるはずである。しかしながらハドロンが現れるエネルギースケールでは、結合定数が極端に大きく摂動計算できないことから、現象を QCD から直接説明することが難しい。**もっとも単純な「メソンやバリオンがクォークとグルーオンからどのようにできているか」という問いにさえ答えられる状況ではない。**QCD が確立される頃からモデルとして、ボーズ粒子であるメソンはクォークと反クォーク、フェルミ粒子であるバリオンは 3 つのクォークで構成されるとされてきた。ハドロンがこういった「構成子クォーク」で記述できるのは、基底状態と一部の励起状態だけである。現在では、構成子として、ダイクォーク相関、グルーオンやハドロンクラスターなど様々なものが提唱されているが、いずれもモデルに過ぎず系統的なハドロンの記述には至っていない。

ハドロンがどのように記述できるかを調べるには、極端な例となるエキゾチックな粒子を対象とするのがよい。近年、Belle 実験や BaBar 実験の電子・陽電子衝突反応で発見された 2 つのクォークと 2 つの反クォークからなるとされる「テトラクォーク・メソン」、あるいは重陽子衝突反応で発見された 4 つのクォークと 1 つの反クォークからなるとされる「ペンタクォーク・バリオン」は非常によい対象である。しかしながら、これまで見つかったテトラクォーク・メソンやペンタクォーク・バリオンは、重いクォークのクォーク・反クォーク対 $c\bar{c}$ を含むため、クォークと反クォーク数の和が 4、5 といったことは保証できない。バリオン数が 2 となる 6 クォーク粒子「ダイバリオン」もまたハドロンの構成子を理解するのに重要となる。重陽子が最もよく知られたダイバリオンだが、陽子と中性子の弱い束縛状態としての原子核である。高励起状態のダイバリオンでは、このような分子的状態から空間的にコンパクトな 6 クォーク状態になると期待される (図 1)。重陽子以外のエキゾチックなダイバリオンは半世紀も前に予言されたにも関わらず [1]、これまでその存在が確認されてこなかった。しかし 2009 年にスウェーデン CELSIUS/WASA 共同実験者、2011 年にドイツの WASA-at-COSY 共同実験者が相次いで陽子・中性子衝突反応でダイバリオン $d^*(2380)$ を発見したのに引き続き [2,3]、我々は重陽子標的に対して終状態が 2 つの中性 π メソンと重陽子になる光生成反応で、ダイバリオンを新たに 3 つ発見することに成功した [4]。**重陽子を含めてダイバリオンの構造を系統的に調べることで「ハドロンがどのように構成されるか」の謎を解き明かすことを目指す。**

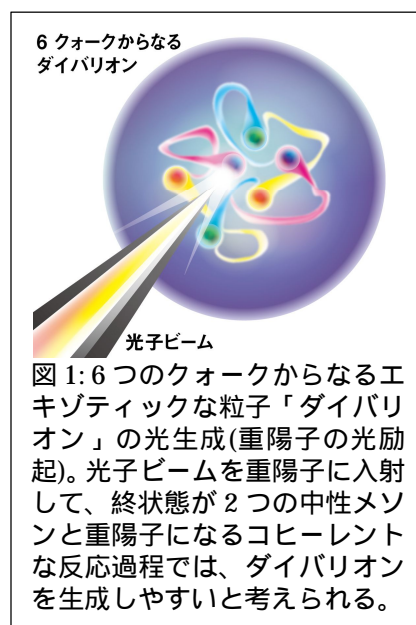


図 1: 6 つのクォークからなるエキゾチックな粒子「ダイバリオン」の光生成(重陽子の光励起)。光子ビームを重陽子に入射して、終状態が 2 つの中性メソンと重陽子になるコヒーレントな反応過程では、ダイバリオンを生成しやすいと考えられる。

[1] F.J. Dyson and N.-H. Xuong, “ $Y = 2$ states in $SU(6)$ theory,” *Phys. Rev. Lett.* **13**, 815 (1964).

[2] M. Bashkanov *et al.* (CELSIUS/WASA collaboration), “Double-pionic fusion of nuclear systems and the “ABC” effect: approaching a puzzle by exclusive and kinematically complete measurements,” *Phys. Rev. Lett.* **102**, 052301 (2009).

[3] P. Adlarson *et al.* (WASA-at-COSY Collaboration), “Abashian-Booth-Crowe Effect in Basic Double-Pionic Fusion: A New Resonance?” *Phys. Rev. Lett.* **106**, 242302 (2011).

[4] T. Ishikawa *et al.*, “First measurement of coherent double neutral-pion photoproduction on the deuteron at the incident energy below 0.9 GeV,” *Phys. Lett. B* **772**, 398 (2017). **先行研究**

2. 研究の目的

本研究では、「重陽子標的に対して終状態が 2 つの中性メソンと重陽子になる光生成反応」でダイバリオンを生成する。新たなダイバリオンの発見を目指すとともに、我々が発見した 3 つのダイバリオンの性質を詳細に調べる。これによりクォーク・グルーオンの複合粒子「ハドロン」がどのように構成されるかの謎の解明を目指す。

ダイバリオンを生成するには、入射粒子のエネルギーが 0.5 ~ 1.5 GeV と高くなければならない。一般に高エネルギー粒子を重陽子に入射したときには、核子を標的とした反応「準自由過程」が起こりやすく、標的とならなかった核子は傍観者として反応に関与しない(図 2)。我々がダイバリオンを発見した $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応では、このような準自由過程が強く抑制され、ダイバリオン生成を浮き彫りにできることがわかった [4]。終状態に重陽子と 2 つの中性メソンが含まれることが最大の特徴であり、ダイバリオン生成を浮き彫りにする条件となる。メソンの生成では運動量移行が大きくなるため、準自由過程では、重陽子が終状態で 2 つのバリオンに分かれやすい。終状態に重陽子を要求することで、重陽子がばらばらになる準自由過程が排除できる。反応に参加した核子と傍観者の核子が再び重陽子に再結合する準自由過程も考えられるが、運動学的な条件から重心系での重陽子の角分布は強い後方ピークを示す。実際、重陽子標的で終状態が 1 つのメソンと重陽子の光生成反応では強い後方ピークを示す。ところが $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応では、このような強い後方ピークは全く見られなかった。この反応では、運動量移行が 2 つの核子間で行われ、これがダイバリオンへの戸口状態となっていると考えられる。 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応でも、重陽子の角分布は重心系でほぼフラットであり、強い後方ピークを示さない。さらに電荷を持たない中性メソンの生成では、共鳴状態を経由しないメソン直接生成のバックグラウンド過程が抑制されると考えられる。

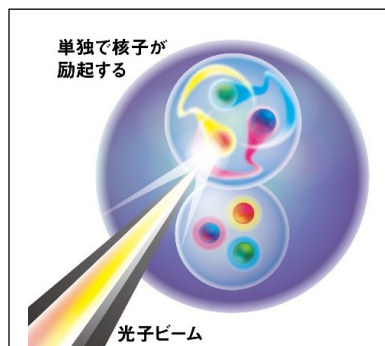


図 2: 高エネルギー粒子を重陽子に入射したときの反応。重陽子ではなくいずれかの核子が励起される準自由過程が支配的である。この場合には、もう一つの核子は傍観者として反応に関与しない。 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応では、このような準自由過程のバックグラウンドを強く抑制でき、図 1 に示したようなダイバリオン生成を浮き彫りにできる。

これまで重陽子を標的としたメソン光生成反応実験が多く行われてきたにも関わらず、我々がダイバリオン生成として注目した「重陽子標的に対して終状態が 2 つの中性メソンと重陽子になる光生成反応」は全く注目されてこなかった。その理由として

1. 断面積が非常に小さい
2. 終状態の重陽子を確認するのが実験的に難しい

が挙げられる。加えて π^0 メソンや η メソンなどの中性メソンは 2 つのガンマ線に崩壊するため、2 つの中性メソンの光生成では、4 つ以上のガンマ線を検出しなければならない。大立体角の電磁力ロリメータが要求されるが、そのような検出器を保有する施設は限られる。実際、我々の $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応の断面積測定は、世界初であった [4]。これまで全く調べられて来なかった「重陽子標的に対して終状態が 2 つの中性メソンと重陽子になる光生成反応」を実験的に調べ、様々なダイバリオンを観測する。

3. 研究の方法

東北大電子光理学研究センター-ELPH の光子ビームと大立体角電磁力ロリメータ FOREST (図 3) を使って、重陽子標的での終状態が 2 つの中性メソンと重陽子になる光生成反応を実験的に調べる。中性メソンは 2 つのガンマ線 γ に崩壊し、これらのガンマ線のエネルギーと方向を FOREST で測定し、 $\gamma\gamma$ 不変質量で中性メソンの同定を行う。FOREST では、ガンマ線だけでなくその他の荷電粒子も検出可能であり、方向と速度を与えることができる。終状態の粒子をすべて検出することで、 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 、 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応の全断面積、および微分断面積を決定し、中間状態に現れるダイバリオンを明らかにする。これまでの $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ に対する実験データで既に 2 つの $I = 0$ のダイバリオンと 1 つの $I = 1$ のダイバリオンの存在を示すことができた。本研究ではまず

1. 統計量
2. 重陽子の検出と識別の効率

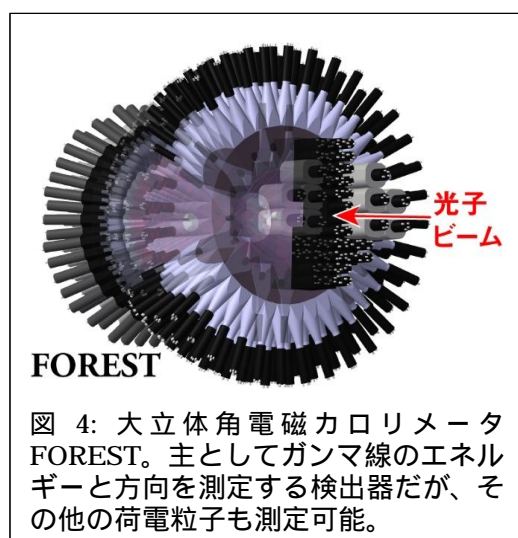


図 4: 大立体角電磁力ロリメータ FOREST。主としてガンマ線のエネルギーと方向を測定する検出器だが、その他の荷電粒子も測定可能。

の向上をはかって実験データを収集する。FOREST 検出器を使った実験では、運動量と飛行時間から荷電粒子の識別を行うといったことはできない。そのため運動学的フィットと呼ばれる拘束条件

1. 始状態と終状態でのエネルギーと運動量の保存
2. 2つの中性メソンに対応する $\gamma\gamma$ 不変質量に対する制約

のもとでのフィットで重陽子の識別を行う。ここで重要なのは、重陽子が放出される方向を抑えることである。前方電磁カロリメータ前面のホドスコープ(図4)は、5 mm厚の右巻きと左巻きの螺旋形のプラスチックシンチレータ3層で構成され、単独で入射位置が決定できる。このホドスコープの積極的な活用で終状態に表れる重陽子の検出と識別の効率、および入射位置の決定精度の向上を行った。

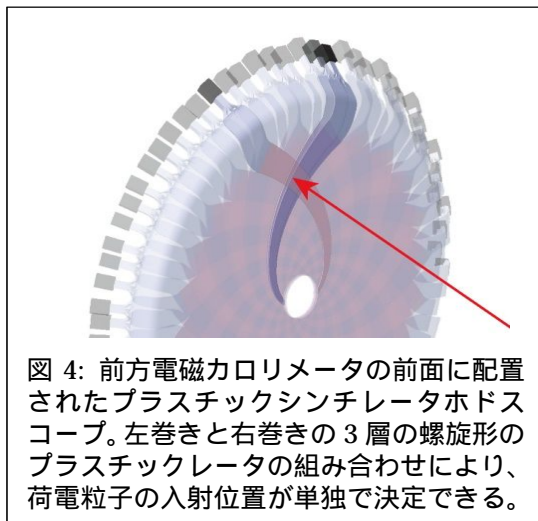


図4: 前方電磁カロリメータの前面に配置されたプラスチックシンチレータホドスコープ。左巻きと右巻きの3層の螺旋形のプラスチックレータの組み合わせにより、荷電粒子の入射位置が単独で決定できる。

2つのメソンが放出される角分布や角相関を詳細に解析することにより、中間状態に現れるダイバリオンのスピン・パリティを決定する。

4. 研究成果

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応で検出された終状態の重陽子の角分布は重心系でほぼフラットであり、準自由過程で想定される角分布と全く異なっていた。このことから3つのダイバリオン X_1 ($I=0$ で質量2.47と2.63 GeV)、 X_2 ($I=1$ で質量2.14 GeV)を中間状態とした $\gamma d \rightarrow X_1 \rightarrow \pi^0 X_2 \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ なる順次過程が起こっている(図5)と結論づけられた[5]。観測された X_2 のダイバリオンについては、これまでいろいろの実験で観測されてきたが、本研究でダイバリオン状態であると初めて同定できた。このダイバリオンの質量は Δ バリオンと核子の質量和より0.02 GeV 軽

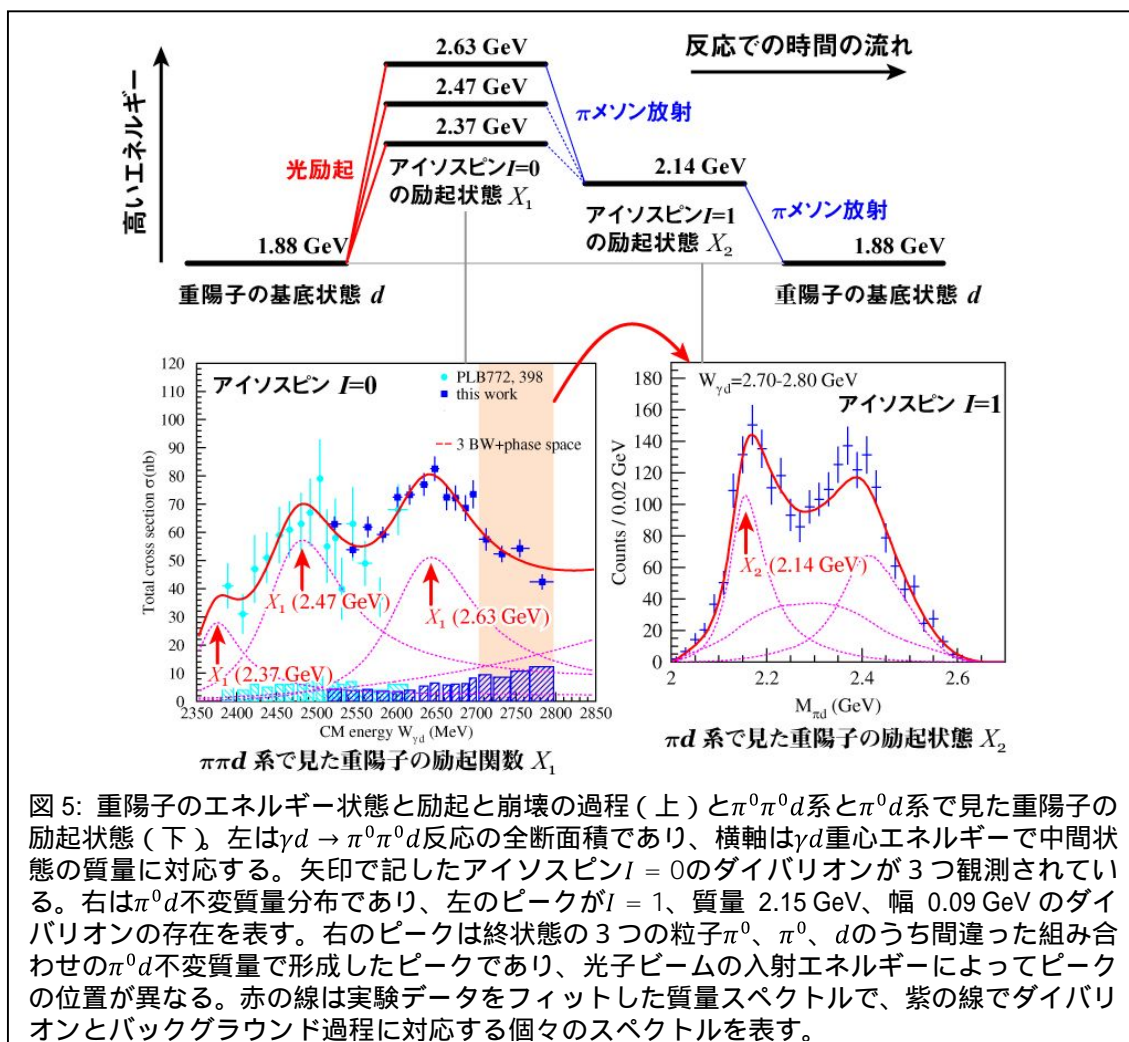


図5: 重陽子のエネルギー状態と励起と崩壊の過程(上)と $\pi^0 \pi^0 d$ 系と $\pi^0 d$ 系で見た重陽子の励起状態(下)。左は $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応の全断面積であり、横軸は γd 重心エネルギーで中間状態の質量に対応する。矢印で記したアイソスピン $I=0$ のダイバリオンが3つ観測されている。右は $\pi^0 d$ 不変質量分布であり、左のピークが $I=1$ 、質量2.15 GeV、幅0.09 GeVのダイバリオンの存在を表す。右のピークは終状態の3つの粒子 π^0 、 π^0 、 d のうち間違った組み合わせの $\pi^0 d$ 不変質量で形成したピークであり、光子ビームの入射エネルギーによってピーク的位置が異なる。赤の線は実験データをフィットした質量スペクトルで、紫の線でダイバリオンとバックグラウンド過程に対応する個々のスペクトルを表す。

く、幅も Δ バリオンの幅 0.12 GeV より細いことから $N\Delta$ 束縛状態に対応すると考えられる。また 2.63 GeV の X_1 についてはスピンパリティ 1^+ と 2^- の状態の混合、2.14 GeV の X_2 については 2^+ であると分かった。

我々が発見したダイバリオンについては、Bonn 大学 ELSA 施設でも同じ反応で追認され [6]、反応に対する理論計算も行われるようになった [7]。

$\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応で検出された終状態の重陽子の角分布もまた重心系でほぼフラットであり、 $\gamma d \rightarrow X_1 \rightarrow \pi^0 X_2 \rightarrow \pi^0 \eta d$ と $\gamma d \rightarrow X'_1 \rightarrow \eta X'_2 \rightarrow \pi^0 \eta d$ の二つの順次過程が起こっていた。前者の順次過程では、 ηd しい値近傍に X_2 として $l = 0, 1^-$ の状態が見られた(図 6)。これは負パリティのダイバリオンの発現であり、親状態である X_1 では $l = 1, 0^-$ の状態が主成分であることが分かった。一方、後者の順次過程では、 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ 反応の $\pi^0 d$ 系で見られたダイバリオンと同じ $l = 1, 2^+$ のダイバリオンが X'_2 として観測され(図 6)、その親状態の X'_1 では $l = 1, 2^+$ の状態が主成分であった。これらの結果はレターとして文献 [8]、フルペーパーとして文献 [9] にまとめている。またこれらの結果に対して、早速、観測されたピークはダイバリオンではなく運動学的な効果に過ぎないという立場で理論計算が行われた [10]。しかしながら理論計算はあまり実験結果を再現しておらず、ダイバリオンの発現と考えるのがもっともらしい。

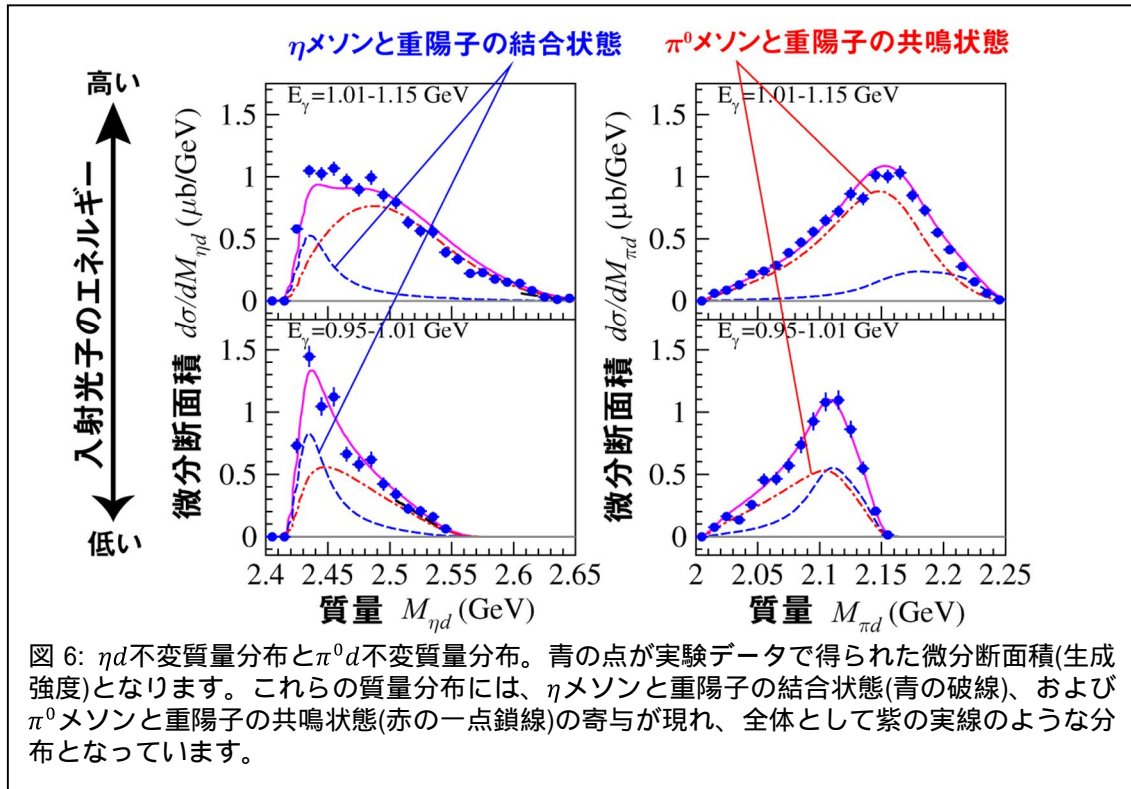


図 6: ηd 不変質量分布と $\pi^0 d$ 不変質量分布。青の点が実験データで得られた微分面積(生成強度)となります。これらの質量分布には、 η メソンと重陽子の結合状態(青の破線)、および π^0 メソンと重陽子の共鳴状態(赤の一点鎖線)の寄与が現れ、全体として紫の実線のような分布となっています。

我々は6つのクォークから構成される新たなハドロン形態であるダイバリオンの観測に成功した。これはクォークが単独では取り出せないという閉じ込め問題に新たな知見を与える。我々が発見したダイバリオンの一部がドイツ・ボン大学の ELSA 施設で追認されたり [6]、反応計算を行う理論研究者も現れ始めたり [7,10]、ダイバリオン分光という新たな分野を切り拓いた。ダイバリオンの構造に対する理解は、未だよく理解されていない核物質の状態方程式や中性子星の内部構造に対して極めて重要な情報をもたらす。

[5] T. Ishikawa et al., “Non-strange dibaryons studied in the $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ reaction,” Phys. Lett. B **789**, 413 (2019). **本研究課題**
 [6] T.C. Jude et al., “Evidence of a dibaryon spectrum in coherent $\pi^0 \pi^0 d$ photo-production at forward deuteron angles,” arXiv:2202.08594.
 [7] Mikhail Egorov, “Coherent photoproduction of two neutral pseudoscalar mesons on light nuclei,” Phys. Rev. C **101**, 065205 (2020).
 [8] T. Ishikawa et al., “Resonance-like structure near the ηd threshold in the $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ reaction,” Phys. Rev. C **104**, L052201 (2021). **本研究課題**
 [9] T. Ishikawa et al., “Coherent photoproduction of the neutral-pion and η -meson on the deuteron at incident energies below 1.15 GeV,” Phys. Rev. C **105**, 045201 (2022). **本研究課題**
 [10] A. Martinez Torres, K. P. Khemchandani, E. Oset, “Theoretical study of the $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ reaction,” arXiv:2205.00948.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 12件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 105 |
| 2. 論文標題 Coherent photoproduction of the neutral-pion and π^0 -meson on the deuteron at incident energies below 1.15 GeV | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 045201-1,12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.045201 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 N. Muramatsu, T. Ishikawa et al. | 4. 巻 1033 |
| 2. 論文標題 SPRING-8 LEPS2 beamline: A facility to produce a multi-GeV photon beam via laser Compton scattering | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment | 6. 最初と最後の頁 166677-1,14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.166677 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 104 |
| 2. 論文標題 Resonance-like structure near the π^0 threshold in the π^0 π^0 reaction | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 L052201-1,6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.104.L052201 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Honda Ryotaro, Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 2021 |
| 2. 論文標題 Continuous timing measurement using a data-streaming DAQ system | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 13H01 -1,20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab128 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Takatsugu Ishikawa for the FOREST collaboration | 4. 巻 62 |
| 2. 論文標題 Coherent Neutral Pion and eta Meson Photoproduction on the Deuteron | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Few-Body Systems | 6. 最初と最後の頁 35-1,5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01621-4 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Kazuya Aoki, Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 2110 |
| 2. 論文標題 Extension of the J-PARC Hadron Experimental Facility: Third White Paper | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 arXiv preprint | 6. 最初と最後の頁 04462-1,261 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2110.04462 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Yutaro Iizawa, Daisuke Jido, Takatsugu Ishikawa | 4. 巻 2201 |
| 2. 論文標題 K-d N reaction for studying charge symmetry breaking in the N interaction | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 arXiv preprint | 6. 最初と最後の頁 06737-1,13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2201.06737 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|----------------------|
| 1. 著者名 Y. Toyama, T. Ishikawa et al. for the NKS2 collaboration | 4. 巻 63 |
| 2. 論文標題 Search for N Resonance State Via the Exclusive Measurement of d d + - Reaction | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Few-Body Systems | 6. 最初と最後の頁 15-1,6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01719-9 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Tetsuo Noro, Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 2020 |
| 2. 論文標題 Experimental study of (p, 2p) reactions at 392 MeV on ^{12}C , ^{16}O , ^{40}Ca and ^{208}Pb nuclei leading to low-lying states of residual nuclei | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 093D02-1,17 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa109 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 N. Muramatsu, T. Ishikawa et al. (LEPS2/BGOegg Collaboration) | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Differential cross sections, photon beam asymmetries, and spin density matrix elements of photoproduction off the proton at $E_\gamma = 1.3\text{--}2.4$ GeV | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C | 6. 最初と最後の頁 025201-1,10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.025201 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 N. Tomida, T. Ishikawa et al. (LEPS2/BGOegg Collaboration) | 4. 巻 124 |
| 2. 論文標題 Search for ^1N Bound Nuclei in the $^{12}\text{C}(\gamma, p)$ Reaction with Simultaneous Detection of Decay Products | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 202501-1,7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.124.202501 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 ^1N scattering length from photoproduction on the proton near the reaction threshold | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review C Rapid Communications | 6. 最初と最後の頁 052201-1,6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.052201 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 241 |
| 2. 論文標題 Non-strange dibaryons studied in coherent double neutral-meson photoproduction on the deuteron | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences | 6. 最初と最後の頁 01007-1,8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202024101007 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 2249 |
| 2. 論文標題 N scattering length from photoproduction on the proton near the threshold | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 030027-1,7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0008651 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 2319 |
| 2. 論文標題 N scattering length from photoproduction on the proton near the threshold | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 080017-1,7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0036979 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 S.X. Nakamura, T. Ishikawa, T. Sato | 4. 巻 2003 |
| 2. 論文標題 Neutron-neutron scattering length from + photoproduction on the deuteron | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 arXiv preprint | 6. 最初と最後の頁 02497-1,23 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2003.02497 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 51 |
| 2. 論文標題 N Scattering Parameters and Possible Λ 'd Bound State from Λ Photoproduction on the Deuteron | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B | 6. 最初と最後の頁 27 ~ 32 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPolB.51.27 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 51 |
| 2. 論文標題 Non-strange dibaryons studied in coherent double neutral-meson photoproduction on the deuteron | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B | 6. 最初と最後の頁 329 ~ 332 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPolB.51.329 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 S. Miyata, T. Ishikawa et al. | 4. 巻 238 |
| 2. 論文標題 Performance of the FOREST/BLC Spectrometer for Study of the Λ -nucleon Interaction via the Λ p n Reaction | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Springer Proceedings in Physics | 6. 最初と最後の頁 705 ~ 708 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-32357-8_113 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 T. Ishikawa et al. | 4. 巻 238 |
| 2. 論文標題 Study of Non-strange Dibaryon Resonances Via Coherent Double Neutral-Meson Photoproduction from the Deuteron | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Springer Proceedings in Physics | 6. 最初と最後の頁 609 ~ 613 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-32357-8_96 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 Qinghua He, Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Measuring Space-Time Properties of the (1232) via Bose-Einstein Correlations | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 024004-1~4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.26.024004 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Non-strange Dibaryon Resonances Observed in Coherent Double Neutral-Pion Photoproduction on the Deuteron | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 022014-1~6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.26.022014 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Yusuke Komatsu, Takatsugu Ishikawa et al. | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Experimental Study of Di-quark Correlation by Charmed Baryon Spectroscopy at J-PARC High-Momentum Secondary Beam Line | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 022029-1~4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.26.022029 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 Satoshi X. Nakamura, Hiroyuki Kamano, Takatsugu Ishikawa | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Photoproduction off the Deuteron and Low-Energy π -Nucleon Interaction | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 023001-1~4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.26.023001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 石川貴嗣、笠木治郎太 | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 最近の研究から「光子ビームで探るクォーク・グルーオン多体系 ダイバリオンの発見から分光へ」 | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 日本物理学会誌 BUTSURI | 6. 最初と最後の頁 1号22~27 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計31件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 16件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Coherent neutral pion and eta meson photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 the 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure in memoriam Simon Eidelman (HADRON 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Coherent neutral pion and eta meson photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 the 24th International Spin Symposium (SPIN2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Non-strange dibaryon resonances explored at J-PARC |
| 3. 学会等名 Second International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (2nd J-PARC HEF-ex WS) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 -ビームを使った陽子標的での メソン生成 |
| 3. 学会等名 J-PARCハドロン研究会2022 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 メソンと重陽子の結合状態の観測 |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」第7回クラスター階層領域研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 d ⁰ 0 0 0d反応に見られるd*(2380)ダイバリオンのシグナル |
| 3. 学会等名 ELPH workshop C031 (多彩なビーム実験と多様な理論的手法で迫るハドロン間相互作用) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 ハドロン実験用電磁カロリメータの開発 |
| 3. 学会等名 測定器開発プラットフォーム& テストビームライン研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 光子ビームを使った N散乱の精密測定による核子共鳴N(1535) S11の研究 |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」第6回クラスター階層領域研究会, |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Coherent neutral pion and eta meson photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific conference on Few-Body problems in Physics (APFB2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 d threshold structure from the $d + \gamma \rightarrow d + \pi^0$ reaction |
| 3. 学会等名 Hadron in Nucleus 2020 (HIN20) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Hadron-hadron scattering length from meson photoproduction |
| 3. 学会等名 Joint THEIA-STRONG2020 and JAEA/Mainz REIMEI Web-Seminar (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Hadron physics from meson photoproduction experiments at ELPH |
| 3. 学会等名 東京工業大学量子物理学ナノサイエンス第307 回セミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 nn scattering length from positive pion photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 東京工業大学インフォーマルセミナー（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 Hadron-hadron scattering length from meson photoproduction |
| 3. 学会等名 ELPH workshop C029 “様々なフレーバー領域で探るクォーク・ハドロン多体系の分光と構造” |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 重水素標的におけるコヒーレント π^0 光生成反応による N 散乱長の決定 |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」ワークショップ（第5回クラスター階層領域研究会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 仮想光子を使った nn 散乱長の精密測定による荷電対称性の破れの研究 |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」ワークショップ(第2回領域全体会議) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川貴嗣 |
| 2. 発表標題 Determination of eta-nucleon scattering length from eta photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」ワークショップ(第3回クラスター階層領域研究会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi X Nakamura |
| 2. 発表標題 Low-energy neutron-neutron scattering studied with pion photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 Hadron in Nucleus 2020 (HIN20) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中村聡 |
| 2. 発表標題 Neutron-neutron scattering length from π + photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 ELPH workshop C029 “様々なフレーバー領域で探るクォーク・ハドロン多体系の分光と構造”(招待講演) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 N scattering length from photoproduction on the proton near the threshold |
| 3. 学会等名 The 15th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, MENU2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Non-Strange Dibaryons studied in coherent double neutral-meson photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 The 12th Internal workshop on the Physics of Excited Nucleons (NSTAR2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 N scattering parameters and possible 1N bound state from photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 3rd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Non-strange dibaryons studied in coherent double neutral-meson photoproduction on the deuteron |
| 3. 学会等名 3rd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 N scattering length from photoproduction on the proton near the threshold |
| 3. 学会等名 The 14th Asia-Pacific Physics Conference 2019 (APPC2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Photo-production of the eta-meson on the deuteron |
| 3. 学会等名 International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takatsugu Ishikawa |
| 2. 発表標題 Dibaryon photoproduction on the deuteron detecting two neutral pions and deuteron |
| 3. 学会等名 KEK/Tokai Internal workshop on "Physics of heavy-quark and exotic hadrons" (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石川 貴嗣 |
| 2. 発表標題 Study of charge symmetry breaking from the precise and accurate measurement of the nn scattering length using virtual photons |
| 3. 学会等名 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」ワークショップ(第1回領域全体会議) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石川 貴嗣 |
| 2. 発表標題 コヒーレントなダブルメソン光生成反応で探るダイバリオン共鳴, |
| 3. 学会等名 ELPH workshop C024 “ハドロン構造における多粒子相関” |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中村 聡 |
| 2. 発表標題 Dynamical coupled-channels approach to electroweak reactions on nucleon and deuteron |
| 3. 学会等名 ELPH workshop C024 “ハドロン構造における多粒子相関” (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yusuke Tsuchikawa |
| 2. 発表標題 Experimental study of a light exotic baryon with neutral meson photoproduction |
| 3. 学会等名 KEK/Tokai Internal workshop on “Physics of heavy-quark and exotic hadrons” (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Satoshi X Nakamura |
| 2. 発表標題 Dynamical coupled-channels approach to electroweak reactions on nucleon and deuteron |
| 3. 学会等名 The 15th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon, MENU2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

プレスリリース「メソンと重陽子の結合状態の観測に成功 クォーク・反クォーク対を構成要素とする重陽子の励起状態の発見」
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/11/press20211130-03-meson.html>
プレスリリース「E重陽子の励起状態の観測に成功 クォークの閉じ込め問題に迫る！」
<http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/01/press20190107-dibaryon.html>
Webサイト「光子ビームによるダイバリオン状態の研究」
<http://www.ins.tohoku.ac.jp/hadron/mbr/ishikawa/j2021c.html>
Webサイト「光子ビームによるダイバリオン状態の研究」
<http://www.ins.tohoku.ac.jp/hadron/mbr/ishikawa/j2020c.html>
Webサイト「光子ビームによるダイバリオン状態の研究」
<http://www.ins.tohoku.ac.jp/hadron/mbr/ishikawa/j2019c.html>

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

| 国際研究集会 | 開催年 |
|--|-------------|
| YITP internal workshop, Hadron in Nucleus 2020 (HIN20) | 2021年～2021年 |

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|