

令和元年6月21日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05379

研究課題名(和文) の光生成を用いた陽子と中性子の中の反クォーク構造の研究

研究課題名(英文) Anti-quark structures of proton and neutron studied by the photoproduction of pi and Delta

研究代表者

郡 英輝 (Kohri, Hideki)

名古屋大学・理学研究科・特任講師

研究者番号：40448022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：私達はSPRing-8/LEPS実験施設において、エネルギー1.5～3GeVの直線偏光光子を用いて中間子生成の研究を行った。陽子標的の $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ 、 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^0 \Delta^+$ 反応に関して、 $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ はPhysical Review C、 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ はPhysical Review Letters、 $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ はFew-Body Systemsへ結果を発表する事ができた。

中性子標的の $\gamma n \rightarrow \pi^+ \Delta^-$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^- \Delta^+$ 反応に関しては、ビームタイムの制限により目標の20%程度しかデータ収集を行う事ができなかったが、データの質は良く、2-3年後にはデータ収集を終えて結果を発表する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回発表した中間子光生成反応では、 $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ 、 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^0 \Delta^+$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^+ \Delta^-$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^- \Delta^+$ クォーク対、 $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ 、 $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^0 \Delta^+$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^+ \Delta^-$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^- \Delta^+$ クォーク対の生成を分離して研究する事ができる。これは初めての試みであり、高エネルギー光子によってどのようなメカニズムでハドロンが生成されるかを解明するために極めて重要な意義が有る。反応 $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ の超前方角度断面積の比は、アイソスピンから予測される比とほぼ同じであり、ハドロン生成に関する理解を深める重要な結果になった。大きな角度での断面積は予測より大きな値であり、アイソスピン2の奇妙な粒子の交換が、核子の中の豊富な反dクォークが反応 $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^+$ を促進していると考えられる興味深い結果になった。

研究成果の概要(英文)：We carried out a meson production experiment by using linearly polarized photon beams with energies of 1.5-3 GeV at SPRing-8/LEPS. We published two experimental results of (1) $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ and (2) $\gamma p \rightarrow K^+ \Lambda$ in Physical Review C. We also successfully published experimental results of (3) $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ and (4) $\gamma p \rightarrow \pi^0 \Delta^+$ in Physical Review Letters and Few-Body Systems, respectively. We took data for the (5) $\gamma n \rightarrow \pi^+ \Delta^-$ and (6) $\gamma n \rightarrow \pi^- \Delta^+$ reactions and confirmed that the data quality was good enough. However, the number of events was about 20% of the events needed for the publication of the results. We plan to continue data taking and publish the results in 2-3 years.

研究分野：ハドロン実験

キーワード：中間子 偏極 フォトン クォーク 反クォーク SPRing-8 光生成 核子構造

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

歴史的に古代ギリシャ・ローマ時代から、人類は「万物が何からできているか？」を考えて調査することによって、アトム(原子)の概念を持ち、4つの力や様々な法則を理解し、電磁気エネルギーや原子力エネルギー等を発見して、科学を発達させて地球文明を創り上げてきた。約30年前に「スピンの危機」と呼ばれる発見があり、CERN研究所のレプトン深非弾性散乱実験によると、陽子のスピンの中でクォークによるスピンの寄与はたった30%である驚きの事実がわかった[1]。

近年の $\mu^+\mu^-$ 対生成 Drell-Yan 実験[2] やレプトン深非弾性散乱実験[3]によると、陽子の中ではSU(2)対称性が破れていて、図1のように反dクォーク(\bar{d})の方が反uクォーク(\bar{u})よりも多く存在する事を示唆する衝撃的な結果が出て来た。uudクォークから成る陽子の質量(938.27 MeV)と比較してuddクォークから成る中性子の質量(939.57 MeV)はたった0.1%の違いしか無く、SU(2)対称性は非常に良い精度で成り立つ事が知られている。 \bar{u} と \bar{d} の質量はどちらも数MeVと小さく質量差がほとんど無く、どちらも容易に陽子の中で創られては消滅していると考えられているので、 \bar{d} と \bar{u} の含有量に大きな差が見つかった事のインパクトは強烈であり、陽子の中にはまだ明らかにされていない謎の法則が隠れているように思える。

\bar{d} が \bar{u} より多い SU(2)対称性の破れ

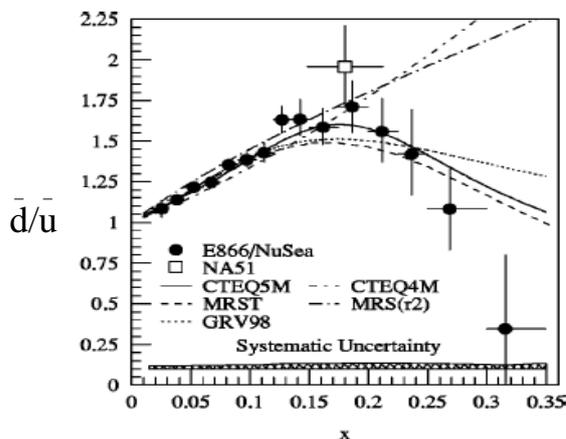


図1 : Drell-Yan 実験(E866/NuSea)[2]とレプトン深非弾性散乱実験(NA51)[3]による、陽子の中の反dクォーク(\bar{d})と反uクォーク(\bar{u})の含有量の比。X軸はパートン(素粒子)の運動量の割合。

[1] J. Ashman *et al.* Phys. Lett. B 206 (1988) 364.

[2] R.S. Towell *et al.* Phys. Rev. D 64 (2001) 052002.

[3] A. Baldit *et al.* Phys. Lett. B 332 (1994) 244.

2. 研究の目的

30年前の「スピンの危機」で、クォークのスピンは陽子のスピンの30%しか寄与していない事実が判明した。近年高エネルギー実験により示唆された反dクォーク(\bar{d})が反uクォーク(\bar{u})より多いという「陽子の中のSU(2)対称性の破れ」も衝撃的な結果であるが、終状態に多くの粒子が生成されている不確定性が多い実験の結果なので、不確定性の少ない明白な実験により事実を検証する必要がある。私達は終状態が $\pi\Delta$ になる光生成反応を使って、陽子標的に対して $u\bar{u}$ 対と $d\bar{d}$ 対生成を精密に比較する独創的な実験を行い、 \bar{d} の量が多い事を示唆する証拠を得た。次は重水素標的の実験を行い、中性子の $u\bar{u}$ 対、 $d\bar{d}$ 対構造を初めて解明する。物質の起源の解明は物理学の最重要課題の1つであり、世界人類の多くが持つ問いに日本の実験結果で正しく答を出す意義がある。

3. 研究の方法

これまでの研究は数100 GeVという高エネルギーを使った実験であり、終状態に多くの粒子が複雑に生成されるInclusive反応による結果である。また、結果を導き出す過程でいくつかの大胆な仮定が入っており、不確定性が多いという弱点も存在する。 $\bar{d}/\bar{u} > 1$ の結果を検証するために、単純なExclusive反応を使って不確定性が少ない結果を出すことができる実験が強く求められており、私は $\pi\Delta$ の2体が終状態に生成する単純明白な光反応により、陽子や中性子の中の \bar{d} と \bar{u} を精密に比較する独創的

な実験を思い付いた。図2のように、 π 中間子が前方で生成される角度において $\gamma p \rightarrow \pi^+ \Delta^0$ と $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ 反応を観測することで $d\bar{d}$ 対と $u\bar{u}$ 対生成を精密に比較できることに気づき、SPring-8のフォトンビーム ($E_\gamma=1.5-3.0$ GeV) を使って実験を行った。同じビーム、同じ標的、同じアクセプタンス(検出効率)による同時実験による比較は精度が高く、他のどの実験よりも正確に $d\bar{d}$ 対と $u\bar{u}$ 対生成を比較することができる。

π 中間子が超前方に生成される領域では、 t チャンネルでの π 中間子/ ρ 中間子交換(アイソスピン1)が最有力と考えられる。この場合は $\pi^+ \Delta^0$ と $\pi^- \Delta^{++}$ 反応の断面積の比は必ず $1/3$ になる事がアイソスピンの法則(クレプシュゴールドン係数)から予測されるので、 $1/3$ からずれた場合は π^+ 中間子の雲の影響が考えられる。陽子の中に \bar{d} が \bar{u} よりも多く存在する1番有力な説明が図3のような π^+ 中間子($\bar{d}u$)の雲であり、 π^+ 中間子の光生成にどれだけの寄与をするかは明らかにされていないが、初めから存在している π^+ 中間子は必ず寄与するはずである。

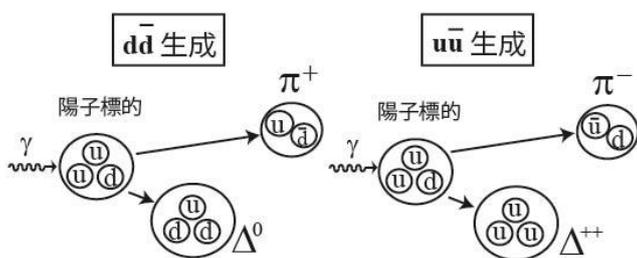


図2：私が行った $d\bar{d}$ 対生成と $u\bar{u}$ 対生成の精密比較実験。

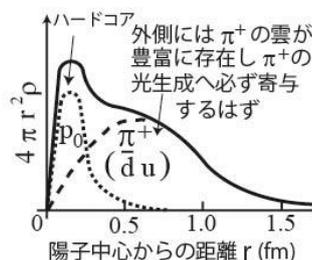


図3：陽子の電荷分布。

4. 研究成果

陽子を標的とした $\gamma p \rightarrow \pi^+ \Delta^0$ 、 $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ 反応の結果

図4は、 π 中間子を検出した角度 $0.7 < \cos\theta < 0.8$ 、 $0.8 < \cos\theta < 0.9$ 、 $0.9 < \cos\theta < 0.933$ 、 $0.933 < \cos\theta < 0.966$ 、 $0.966 < \cos\theta < 1$ における断面積比 $\sigma(\pi^+ \Delta^0)/\sigma(\pi^- \Delta^{++})$ である。ここで角度 θ は重心系(CM系)での角度である。 π 中間子を超前方角度で検出した場合 ($0.966 < \cos\theta < 1$)、断面積比が $1/3$ に近い値になった。 $1/3$ は t チャンネルでアイソスピン1の粒子(π や ρ 中間子など)が交換されてこれらの反応が起こった時に予測される比であり、私達のハドロン生成に関する理解が正しい事を確認できる重要な結果が得られた。

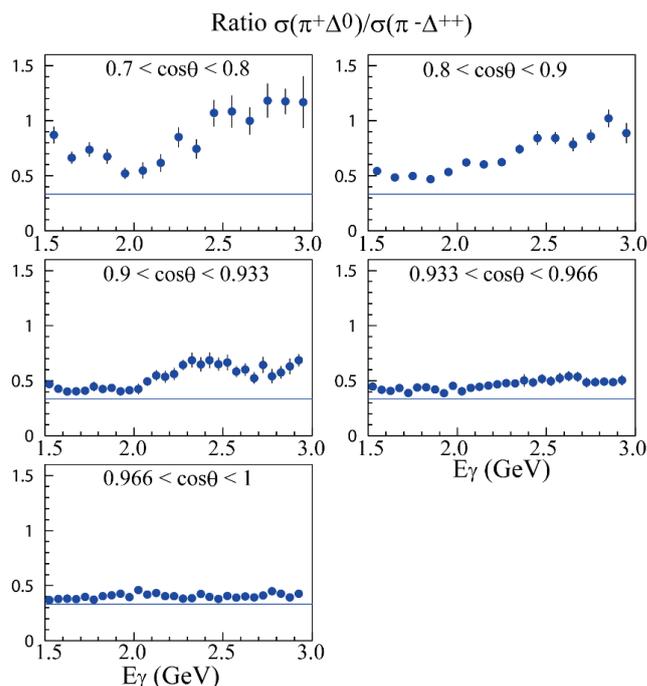


図4：陽子標的からの断面積比 $\sigma(\pi^+ \Delta^0)/\sigma(\pi^- \Delta^{++})$ 。

一方興味深い事に、大きな角度やエネルギーが高くなった場合に、断面積比が $1/3$ よりも大きくなっている。この現象は、 $E_\gamma = 16$ GeV のCERNで行われた実験[4]でも観測されており、中間状態の Δ^* の生成によるものとは考えにくい。(中間状態の Δ^* の生成では断面積比 $4/3$ になる。)

一方興味深い事に、大きな角度やエネルギーが高くなった場合に、断面積比が $1/3$ よりも大きくなっている。この現象は、 $E_\gamma = 16$ GeV のCERNで行われた実験[4]でも観測されており、中間状態の Δ^* の生成によるものとは考えにくい。(中間状態の Δ^* の生成では断面積比 $4/3$ になる。)

[4] A. M. Boyarski et al. (SLAC collaboration) Phys. Rev. Lett. 25 (1970) 695

もし t チャンネルでアイソスピン 2 のエキゾチックな粒子が交換されたと仮定すると、断面積比 3 が予測されてこの結果を説明する 1 つの可能性と考えられる。また、アイソスピン 1 の π 中間子と ρ 中間子の交換反応による干渉効果も可能性の 1 つに成り得る。最後に、陽子の中に豊富に存在すると考えられる \bar{d} が $\pi^+\Delta^0$ の生成を促進したという可能性も考えられる。ハドロン生成に核子の中のクォーク-反クォーク対や π 中間子の雲が強く関係するという研究結果は多く存在するので、今回の結果が陽子の中の豊富な \bar{d} が原因である可能性は十分に有り得る。

$\gamma p \rightarrow \pi^+\Delta^+$ 反応の最終結果は、2018年5月に *Physical Review Letters* 誌へ発表した。現在は理論物理学者と共に今回の結果が何を意味しているかを詳細に議論していて、 $\gamma p \rightarrow \pi^+\Delta^0$ 反応の最終結果もできるだけ早く論文として発表する。

中性子を標的とした $\gamma n \rightarrow \pi^-\Delta^+$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^+\Delta^-$ 反応の結果

私達は、陽子標的を使って $u\bar{u}$ 対生成と $d\bar{d}$ 対生成との精密比較実験を成功させた。この方法を中性子標的からの反応へと応用して、 $\gamma n \rightarrow \pi^-\Delta^+$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^+\Delta^-$ 反応実験を行えば、図5のように中性子標的からの $u\bar{u}$ 対生成と $d\bar{d}$ 対生成との精密比較を行う事ができる。

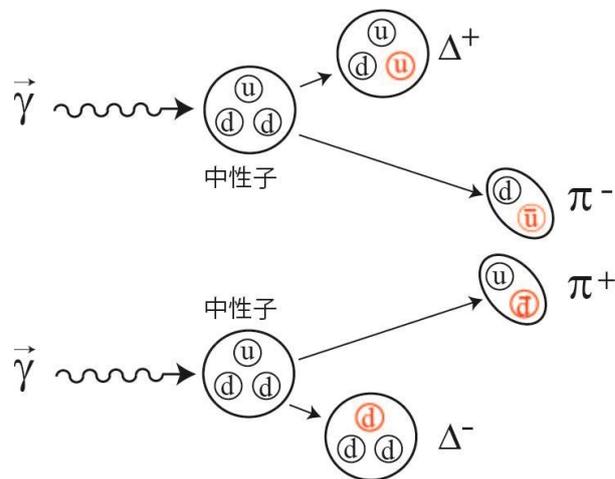


図 5 : 中性子を標的とした $\gamma n \rightarrow \pi^-\Delta^+$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^+\Delta^-$ 反応で、それぞれ $u\bar{u}$ 対と $d\bar{d}$ 対が生成される様子。

図 6 は私達が SPring-8/LEPS 実験グループの協力で取得した実験データの欠損質量分布である。 $\gamma n \rightarrow \pi^-\Delta^+$ 、 $\gamma n \rightarrow \pi^+\Delta^-$ 反応に関して質の良いデータが取れていることを確認できた。しかし、ビームタイムの制限により、本研究期間中に全てのデータを取り終えることはできずに、約 20% 程度のデータ収集に終わった。私達は、今後 2-3 年以内に実験データを取り終えて、最終結果を論文として発表する。

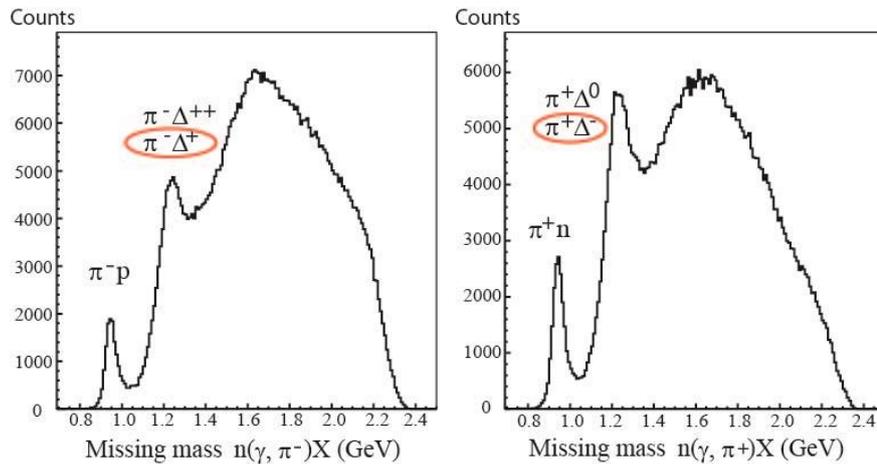


図6：重水素を標的とした π^- 生成(左)と π^+ 生成(右)反応の欠損質量。
 静止した中性子標的は存在しないので、重陽子を標的として使用して、
 陽子標的のデータを引き算して中性子標的からの反応を観測する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- (1) Authors : **H. Kohri(研究代表者)**, S. Y. Wang, S. H. Shiu, W. C. Chang, Y. Yanai et al.
 (LEPS Collaboration)
 Journal : Physical Review C誌 97巻 015205頁(2018年) 査読有り
 Title : Differential cross section and photon-beam asymmetry for the $\gamma p \rightarrow \pi^+ n$ reaction at forward π^+ angles for $E_\gamma = 1.5\text{-}2.95$ GeV
- (2) Authors : S. H. Shiu(国立台湾中央大学で博士号取得), **H. Kohri(研究代表者)** et al.
 (LEPS Collaboration)
 Journal : Physical Review C誌 97巻 015208頁(2018年) 査読有り
 Title : Photoproduction of Λ and Σ^0 hyperons off protons with linearly polarized photons at $E_\gamma = 1.5\text{-}3.0$ GeV
- (3) Authors : **H. Kohri(研究代表者)**, S. H. Shiu, W. C. Chang et al. (LEPS Collaboration)
 Journal : Physical Review Letters誌 120巻 202004頁(2018年) 査読有り
 Title : Differential cross section and photon-beam asymmetry for the $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}(1232)$ reaction at forward π^- angles for $E_\gamma = 1.5\text{-}2.95$ GeV
- (4) Authors : **H. Kohri(研究代表者)** for LEPS Collaboration
 Journal : Few-Body Systems誌 59巻 88頁(2018年) 査読有り
 Title : Photoproduction of $\pi^- \Delta^{++}$, $\pi^+ \Delta^0$, and $\pi^+ n$ on the proton at $E_\gamma = 1.5\text{-}3.0$ GeV
<https://doi.org/10.1007/s00601-018-1411-x>
- (5) Authors : T. Hiraiwa, ..., **H. Kohri(研究代表者)** et al. (LEPS Collaboration)
 Journal : Physical Review C誌 97巻 035208頁(2018年) 査読有り
 Title : First measurement of coherent ϕ -meson photoproduction from helium-4 near threshold

- (6) Authors : K. Mizutani, ..., [H. Kohri\(研究代表者\)](#) et al. (LEPS Collaboration)
 Journal : Physical Review C誌 96巻 062201(R)頁(2017年) 査読有り
 Title : ϕ photoproduction on the proton at $E_\gamma = 1.5\text{-}2.9$ GeV
- (7) Authors : S. Y. Ryu, ..., [H. Kohri\(研究代表者\)](#) et al. (LEPS Collaboration)
 Journal : Physical Review Letters誌 116巻 232001頁(2016年) 査読有り
 Title : Interference effect between ϕ and $\Lambda(1520)$ production channels in the
 $\gamma p \rightarrow K^+ K^- p$ reaction near threshold

[学会発表] (計 7 件)

- (1) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : NSTR2015 場所 : Osaka, Japan 期間 : May25-28 2015 年
 Title : Photoproduction for N^* and related topics at LEPS/LEPS2
- (2) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : EMIN2015 場所 : Moscow, Russia 期間 : Oct5-8 2015 年
 Title : Comparison between $u\bar{u}$ and $d\bar{d}$ productions by the $\gamma p \rightarrow \pi^- \Delta^{++}$ and $\pi^+ \Delta^0$
 reactions at forward π angles at $E_\gamma = 1.5\text{-}3.0$ GeV
- (3) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : BARYON2016 場所 : Florida, USA 期間 : May16-20 2016 年
 Title : Photoproduction of $\pi^- \Delta^{++}$ and $\pi^+ \Delta^0$ on the proton for comparing $u\bar{u}$ and $d\bar{d}$
 productions at SPring-8/LEPS
- (4) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : HAPHY2016 場所 : Pohang, Korea 期間 : Nov22-24 2016 年
 Title : Photoproduction of $\pi\Delta$ on the proton, and near future LEPS and LEPS2
 experiments at SPring-8
- (5) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : NSTAR2017 場所 : South Carolina 期間 : Aug20-23 2017 年
 Title : Photoproduction of $\pi^- \Delta^{++}$, $\pi^+ \Delta^0$, and $\pi^+ n$ on the proton at $E_\gamma = 1.5\text{-}3.0$ GeV
- (6) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : HADRON2017 場所 : Salamanca, Spain 期間 : Sep25-29 2017 年
 Title : Photoproduction of $\pi^- \Delta^{++}$ and $\pi^+ \Delta^0$ on the proton for the comparison
 of $u\bar{u}$ and $d\bar{d}$ productions
- (7) Speaker : [H. Kohri\(研究代表者\)](#)
 Conference : EMIN2018 場所 : Moscow, Russia 期間 : Oct8-11, 2018 年
 Title : Recent results of pion and kaon photoproduction at SPring-8/LEPS

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。