

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03674

研究課題名(和文)非摂動QCDから摂動QCDへの移行領域におけるクォークカウンティング則の検証

研究課題名(英文)study of the quark counting rule in the transition region from non-perturbative QCD to perturbative QCD

研究代表者

住浜 水季 (Sumihama, Mizuki)

岐阜大学・教育学部・准教授

研究者番号：10396426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：非摂動QCDから摂動QCDへ移行するエネルギー領域でのクォークカウンティング則の検証実験を、大型放射光施設スプリングエイトのレーザー電子光施設LEPS1とLEPS2で行った。実験に必要な性能・統計量のあるデータ収集を行い、ハドロン光生成反応断面積のエネルギー依存性を算出した。円偏光ビームの生成と形状測定を行った。また、直線偏極ビームのモニター装置をMPPAアレイで作成し、性能評価を行い、実験でモニターとして使用できることがわかった。MPPCを用いたスタートカウンターの開発も行い、130 ps程度の時間分解を達成することができた。中性粒子の検出器であるカロリメータの改良と性能評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでのハドロン実験は、生成・崩壊過程の観測量から粒子の量子数の決定を行ってきたが、エキゾチックハドロンの構造解明に至っていない。本研究はクォークカウンティング則からクォーク数を決定するという新たな手法で、そのための、検証になる。本研究ではハドロン光生成反応実験を行った。そのスケーリングの挙動が分かれば、さらにエキゾチックハドロンと呼ばれるハドロンの内部構造の研究が進むことは間違いない。本研究を通して、MPPCを用いた検出器開発も行った。磁場に強く、高レート下でも動作し、非常にコンパクトで感度の良いMPPCの性能を利用して、ビームモニターや時間測定カウンターの開発が進み、汎用性を示せた。

研究成果の概要(英文)：To study the quark counting rule, the experiment of the meson photoproduction carried out at Spring-8/LEPS1 and LEPS2 in the energy range where the transfer region from the non-perturbative QCD to the perturbative QCD. The data taken is enough quality and statistics for this study. The energy dependences of meson photoproductions have been calculated. For this experiment, the beam profile of the circular polarized photon beam was measured. To monitor the profile of the linearly polarized photon beam, the monitor with the MPPC array was developed. It is well performed. The start counter with MPPCs was developed to achieve the 130 ps time resolution. The calorimeter to detect neutral particles was modified and studied for its performance. The energy calibration was done by the minimum ionization peak of cosmic rays.

研究分野：ハドロン物理学実験

キーワード：クォークカウンティング則 ハドロン構造

1. 研究開始当初の背景

近年多数のエキゾチックハドロンが発見されている。ハドロン物理学において、これらハドロンの多彩な構造を量子色力学 (QCD) で理解することが課題となっている。構成子クォーク模型では、ハドロンは2個または3個のクォークで構成される (構成子クォーク) とし、基底状態のハドロンをよく説明できている。しかし、1700 MeV 以上の励起状態になると、実験で発見されたが、構成子クォーク模型で再現できない粒子や、クォーク模型で予言されているけれど実験で見つからない粒子がある。さらに、2個や3個の構成子クォークでは説明できず、エキゾチックハドロンと考えられているテトラクォークやペンタクォーク、また核子・中間子束縛状態と考えられている $\Lambda(1405)$ 粒子などがある。

しかし、ハドロンの内部構造を実験的に解明するのは容易なことではない。エキゾチックハドロンの構成子クォーク数を実験で決定できれば、ハドロンの多彩な構造を解明する鍵となる。

2. 研究の目的

ハドロンの構成子クォーク数を実験で決定することは重要課題といえる。そこで、非摂動 QCD から摂動 QCD へ移行する 2 ~ 3 GeV の光子ビームを用いて、ハドロン生成反応断面積のエネルギー依存性を測ることで、この領域でのクォークカウンティング則の検証を行う。また、実験に必要な検出器開発を行う。

3. 研究の方法

レジエ理論によると摂動 QCD 領域での前方散乱の場合、反応微分断面積は $\frac{d\sigma}{dt} \propto s^{2\alpha(t)-2}$ と表せる。ここで、 $\alpha(t)$ はレジエ軌跡であり、 t チャンネル (後方では u チャンネル) で交換される中間子を表している。運動量移行が大きい角度ではレジエ軌跡の飽和によりエネルギーに対してスケーリングの挙動を示す。これがクォークカウンティング則で、断面積のエネルギー依存性は $\frac{d\sigma}{dt} \propto s^{2-n}$ となる。ここで n は反応に寄与した構成子クォークの総和である。この法則が成り立つということは構成子クォークがハドロンの自由度であるといっておく、よってこの指数を測定することで、ハドロンの構成子クォークの数を知ることができる。

実験は以下のように行う。

大型放射光施設 SPring-8 のレーザー電子光施設 LEPS1 で 2.4 GeV までのエネルギー領域で収集したデータを解析し、水素標的による中間子光生成反応と、重水素・He 標的による光崩壊の断面積のエネルギー依存性を求める。

新設される LEPS-2 で 3 GeV までエネルギーを上げて、大立体角で水素・重水素・He 標的のデータを取得し、断面積のエネルギー依存性を測り、スケーリング挙動を調べる。

本研究のために耐久性のある MPPC を用いた新型スタートカウンターを製作し、実験に導入する。ビームモニターを開発し、設置する。

4. 研究成果

LEPS-1 ではすでにデータ収集が終了している。検出器の性能評価が完了し、エネルギー・運動量の較正を進め、物理の結果を得るに十分な統計と性能が得られていることがわかった。そのうえで、水素標的と重水素標的のデータ解析を他大学の研究者と議論をしつつ行った。

LEPS-II での研究遂行のために、円偏極ビームの生成とその形状の測定、直線偏極ビームのモニター装置の開発を行った。円偏極ビームの取り出し用コントローラーの動作試験やその操作プログラムの開発を行った。円偏極ビームを用いた実験は初めての試みで、95%程度の偏極度が得られることがわかった。MPPC アレイを用い、ビーム位置と形状の測定を行い、物理データ取得できる位置・サイズであることがわかった。LEPS-II ではレーザー電子光の生成点から標的や検出器まで 100 m ほどの距離があり、ビームの位置と形状のモニターが必要である。そのために MPPC アレイを用いることにした。直線偏極ビームの水平方向偏極と垂直方向偏極のビーム形状を測定した。その結果、これらの形状が理論計算で得られる形状にほぼ一致していること、ビーム位置を 1mm 程度の精度で測定できることがわかった。つまり、MPPC アレイをビームモニターに使用できることがわかった。レートも数 kHz 程度であり、耐久性の問題もない。

当初の予定のタギングカウンターの開発には至らなかったが、MPPC を用いたスタートカウンターの開発も行った。スタートカウンターは 1 テスラの磁場中に置かれ、トラッキング用検出器の内側に置かれるため、配置や大きさに制約がある。磁場に弱く、スペースを取る光電子増倍管ではなく、MPPC を用いることで、このような状況下での使用が可能となった。シュミレーションを用いた光量・集光計算結果をもとに、MPPC の個数や配線を工夫し開発を行った。その結果、130 ps 程度の時間分解を達成することができ、粒子識別に必要な十分な性能が得られた。

本研究では、 π^0 や η 中間子生成反応を測定する。これらの中性粒子は線に崩壊するため、線検出器の開発を行った。線検出器は、電磁力ロリメータで、磁場による影響の評価と用いる光電子増倍管(PMT)の検出効率の調整及び評価を行った。線検出器はソレノイドヨークの内側にバレル上に配置され 4 層 48 セグメントから構成され、現在は 2 層の全セグメントに PMT を装着している。ヨーク内に光電子増倍管があるため、磁場の影響を受ける。磁気遮蔽を効率的に行い、LED と宇宙線によりエネルギー較正を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Muramatsu N. and LEPS2/BGOegg Collaboration	4. 巻 100
2. 論文標題 Measurement of neutral pion photoproduction off the proton with the large acceptance electromagnetic calorimeter BGOegg	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 55202
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.100.055202	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 Li Y.B., and Belle Collaboration	4. 巻 122
2. 論文標題 First Measurements of Absolute Branching Fractions of the Λ_c^0 Baryon at Belle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 82001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.082001	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 Sumihama M., and Belle Collaboration	4. 巻 122
2. 論文標題 Observation of $(1620)^0$ and Evidence for $(1690)^0$ in $c^+ \rightarrow s^+ + \pi^0$ Decays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 72501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.072501	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 Kaliyar A. B., and Belle Collaboration	4. 巻 99
2. 論文標題 Measurements of branching fraction and direct CP asymmetry in $B_{\pm} \rightarrow K_S^0 K_S^0 K^{\pm}$ and a search for $B_{\pm} \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^{\pm}$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 31102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.031102	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 Niiyama M., Sumihama M., Nakano T. and Belle Collaboration	4. 巻 97
2. 論文標題 Production cross sections of hyperons and charmed baryons from e^+e^- annihilation near $s=10.52\text{ GeV}$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 72005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.072005	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 Yelton J., and Belle Collaboration	4. 巻 121
2. 論文標題 Observation of an Excited Λ Baryon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 52003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.052003	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

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 水田亮, 與曾井優, 住浜水季, E.A. Stokovsky, 山本林那, 渡邊憲
2. 発表標題 SPRing-8/LEPS2ソレノイドスペクトロメータ用トリガー検出器の開発とその性能評価
3. 学会等名 日本物理学学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizuki Sumihama, and Belle collaboration
2. 発表標題 Studies of $\Xi(1620)^0$ and $\Xi(1690)^0$ hyperons at Belle
3. 学会等名 The 15th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizuki Sumihama, and Belle collaboration
2. 発表標題 Recent results on hyperons and charmed baryons at Belle
3. 学会等名 The 15th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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0件

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
---------	---------