

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 18 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800133

研究課題名(和文) SeaQuest実験における陽子内の反クォーク分布量の絶対値の測定

研究課題名(英文) Measurement of Absolute Amount of Anti-Quarks in Proton at SeaQuest Experiment

研究代表者

中野 健一 (Nakano, Kenichi)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：20525779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：アメリカ フェルミ国立加速器研究所にて陽子ビームと液体水素・重水素標的を用い、陽子+陽子と陽子+重陽子で生じるドレル・ヤン反応を測定した。測定量から陽子内の反uと反dの分布量の非対称度および各分布量の絶対値を導出する事を目指している。平成25年11月から平成28年7月(予定)まで3期間に分けて物理データ収集を行ない、その前半にビーム強度の絶対値の測定器を開発・導入した。収集した物理データを解析し、反uと反dの分布量の非対称度(反d/反u)の preliminary な結果を求めた。

研究成果の概要(英文)：The Drell-Yan process from proton+proton and proton+deuteron reactions was measured using proton beam and liquid hydrogen/deuterium targets at Fermilab in USA. It is aimed at deriving the asymmetry and the absolute amounts of anti-up and anti-down quarks in the proton. Physics data were accumulated in three data-taking periods from H25/11 to H28/07 (planned), and in the first period a detector for absolute beam intensity was developed and installed. The physics data were analyzed and a preliminary result of the asymmetry of anti-up and anti-down quarks was obtained.

研究分野：素粒子・原子核物理学実験

キーワード：陽子 反クォーク分布 フレーバー非対称性 Drell-Yan反応

1. 研究開始当初の背景

陽子、中性子などを総称してバリオンと呼ぶが、低エネルギーで観測する場合には“3個の構成子クォークの束縛系”として、その静的な性質である質量やスピンを系統的に表すことができる。しかし高エネルギー (= 短距離・短時間) で観測する場合、陽子内部には多数の海クォークやグルーオンが動的に生じる。この動的な性質は多様であり、その多くは現行理論 (量子色力学) で予言できない。本研究が目指す大局の目的は、様々な測定から陽子の内部構造を理解し、その構造を決定している強い相互作用を解明する事である。

アップクォーク (u) とダウンクォーク (d) の対称性 (= フレーバー対称性) は強い相互作用の基本的な性質であり、例えば陽子と中性子の類似性はこの対称性を反映している。しかし陽子内部での反クォークの分布量はフレーバー対称性を大きく破っている事がこれまでに分かっている (図1参照)。陽子の運動量に対するクォークの運動量の比を x と呼ぶが、 $x \sim 0.2$ で反 d は反 u より 70% も多く存在する。非対称性が生じる原理を理解するべく様々な理論的モデルが提案されているが、この検証には更なる精密な実験データが必要である。特に、大きな運動量比 x にて反 d と反 u の大小関係が逆転するのは、理論的に全く予言できない傾向である。

2. 研究の目的

アメリカ フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) にて、フレーバー非対称度 “反 d / 反 u” を測定する実験 (SeaQuest 実験) を行なう。特に運動量比 x の大きな領域で高精度に測定し (図1参照)、反 d と反 u の大小関係の逆転現象を確認する。

初期のデータ収集と並行してビーム強度測定器を開発して SeaQuest 実験に導入し、 $p+p$ と $p+d$ のドレル・ヤン反応断面積の絶対値を測定する。強い相互作用を記述する現行理論 (摂動論的 QCD) との比較検証を行ない、測定した断面積から反 u と反 d の分布量の絶対値を抽出する。これは中間の x 領域 (0.1) における世界初の直接測定の結果になる。

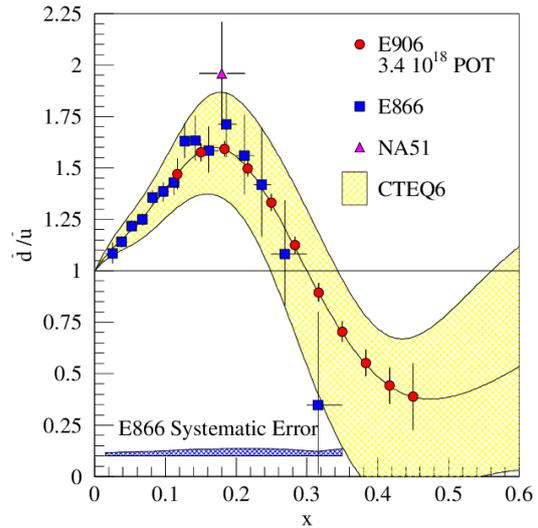


図1: 反 u クォークと反 d クォークの分布の非対称度。縦軸は分布量の比 “反 d/反 u”、横軸は陽子の運動量に対するクォークの運動量の比 x を表す。青点は過去の実験 (E866 実験) による測定結果であり、 $x < 0.2$ で大きな非対称度が生じている。赤点の縦棒は SeaQuest 実験による測定の期待精度であり、 $x > 0.3$ で反 d/反 u を高精度に決定できる。

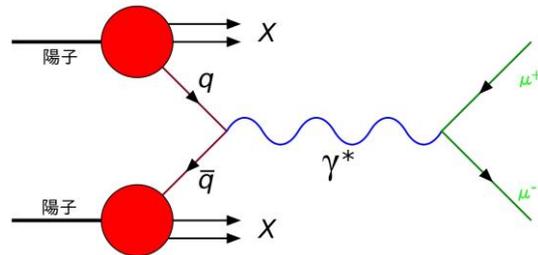


図2: ドレル・ヤン反応過程 $p + p \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ 。陽子内のクォークと反クォークが対消滅する。終状態の $\mu^+ \mu^-$ 対を検出する。

3. 研究の方法

FNAL の加速器 (Main Injector) より供給される 120 GeV の陽子ビームを用いる。このビームのエネルギーは、大きな x でのフレーバー非対称度を測定するのに適している。陽子ビームを陽子標的と重陽子標的に照射して、陽子+陽子 ($p+p$) と陽子+重陽子 ($p+d$) でのドレル・ヤン反応 (図2参照) を起こし、その断面積の比を測定する。断面積の比は “ $1 + \text{反 d} / \text{反 u}$ ” に比例するので、“反 d/反 u” の抽出が可能である。

ビーム強度測定器を開発・導入し、陽子標的と重陽子標的ごとのビーム照射量を計測する。この計測量を用いて、 $p+p$ と $p+d$ でのドレル・ヤン反応断面積の絶対値を導出する。

4. 研究成果

平成 25 年 11 月に FNAL から SeaQuest 実験へ陽子ビームが供給され始め、SeaQuest 実験は物理データを収集する為のビーム実験を開始した。先ず強度の低いビームを用いて検出器の各部分（トリガー、データ収集系、ホドスコープ、ワイヤーチェンバー）を調整した。これは、本研究を含む SeaQuest 実験の全ての研究目的にとって必要なステップである。本研究を遂行する上で特に重要なのはビーム強度の精密測定である。平成 24 年 3-4 月のテスト実験に基づいて検討を重ね、2 台の装置を組み合わせてビーム強度を測定する事にした。一つはビーム強度の相対値を高速（20 nsec ほどの時間変動）に測定する装置であり、もう一つは絶対値を低速（5 sec 内の積分値）に測定する装置である。相対値測定器の製作を平成 25 年 11 月に完了し、実験全体のデータ収集システムと連動したデータ読出を平成 26 年 1 月に実装した。絶対値測定器の設計を平成 25 年 10 月に完了し、主要部分（ビーム電流検知部、信号増幅器）を平成 26 年 1 月までに製作した。

絶対値測定器の具体的な設計を検討した結果、高速応答のビーム電流検知部（Fast Current Transformer: FCT）と位相同期型アンプ（lock-in amplifier）を組み合わせることにより、ビームパルス（53 MHz）と同期してビーム電流を増幅・積算する設計とした。平成 26 年 5 月にビームラインに設置された FCT とアンプの写真を図 3 に示す。

加速器のメンテナンス期間を経て、平成 26 年 11 月～平成 27 年 6 月に物理データ収集を実施した。収集したデータ量は目標値の約 1/4 である。収集したデータを解析し、ドレルーヤン反応と J/psi 生成反応が実験設計通りに検出できている事を確認した。これは、SeaQuest 実験の検出器が設計通りに稼働している事を示す重要な結果である。平成 26 年 8 月にビーム強度絶対値測定器の測定条件（装置の読出パラメータ）の調整を行ない、12 月から定常的なデータ読出を開始した。

加速器のメンテナンス期間を経て、平成 27 年 10 月～平成 28 年 7 月（終了予定）に物理データ収集を実施した。ビーム強度が大きい時にドレルーヤン反応の検出効率が低下することが明らかとなった。本研究の目指す測定精度を達成するにはこの検出効率のビーム強度依存性を理解する必要がある。測定データとシミュレーションを用いて検出効率のビーム強度依存性を定量的に評価し、測定データに対する補正手法を開発した。また、荷電粒子（ミューオン）の飛跡再構成のアルゴリズムなどを改良して、検出効率のビーム強度依存性を低減させた。

陽子内における反クォーク分布のフレーバー非対称性（反 d/反 u: 反ダウクォークと反アップクォークの分布量の比）を測定データから抽出し、その preliminary な結

果を平成 28 年 4 月に公開した：
<http://meetings.aps.org/Meeting/APR16/Session/R10.1>。



図 3: ビームラインに設置されたビーム電流検知部（上）と位相同期型アンプ（下）。

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 6 件)

1. K. Nagai, Y. Goto, Y. Miyachi, S. Miyasaka, K. Nakano, S. Nara, S. Sawada and T.-A. Shibata, 「Progress in probing flavor asymmetry of antiquarks in protons in the E906/SeaQuest experiment at Fermilab」、RIKEN Accel. Prog. Rep.、査読有、48 (2015) 123-123、URL: <http://www.rarf.riken.jp/researcher/APR/APR048/APR048.html>
2. Shiuan-Hal Shiu, Jinyuan Wu, Randall Evan McClellan, Ting-Hua Chang, Wen-Chen Chang, Yen-Chu Chen, Ron Gilman, Kenichi Nakano, Jen-Chieh Peng, Su-Yin Wang, 「FPGA-based trigger system for the Fermilab SeaQuest experiment」、Nucl. Instrum. Meth.、査読有、A802 (2015) 82-88、DOI: 10.1016/j.nima.2015.09.001
3. 中野健一, 澤田真也, 宮地義之, 「フェルミ研ドレル・ヤン実験 SeaQuest の現状 —陽子内の反クォーク分布のフレーバー非対称性—」、高エネルギーニュース、査読有り、34-2 (2015) 81-88、URL: <http://www.jahep.org/hepnews/#Vol134top>

[学会発表] (計 8 件)

1. K. Nakano, 「Status of Physics Run of Fermilab SeaQuest Experiment」、Meeting on High-energy hadron physics at J-PARC、2014年02月13日、KEK 東海キャンパス (茨城県)
2. 宮坂翔, 後藤雄二, 眞田墨, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 奈良旬平, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, 「SeaQuest 実験の Drell-Yan 反応を用いた陽子内の sea クォークのフレーバー非対称度の研究」、日本物理学会 第70回年次大会、2015年03月24日、早稲田大学 (東京都)
3. Kenichi Nakano, 「TMD in Drell-Yan Experiments at Fermilab」、The 10th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (PacSpin2015)、2015年10月08日、Taipei (Taiwan)

[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.nucl.phys.titech.ac.jp/e906/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 健一 (NAKANO, Kenichi)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 20525779

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し