

# ドレル-ヤン反応断面積の精密測定による 陽子内の反クォークのフレーバー非対称性の解明

## Revealing Flavor Asymmetry of Anti-Quarks in Proton by Precise Measurement of Drell-Yan Reaction Cross Section

(日本物理学会推薦)

代表研究者 東京工業大学 中野 健一 Tokyo Institute of Technology Kenichi Nakano

This research belongs to the particle physics, and is aimed at understanding the internal structure of the proton. Recent measurements have revealed that the flavor symmetry of anti-quark distributions (i.e. the amount of u-bar and d-bar quarks) is largely broken. Various theoretical models are being studied to reproduce the flavor asymmetry measured. The E906/SeaQuest experiment at Fermi National Accelerator Lab (FNAL) is to measure the flavor asymmetry with ten-times better precision. It utilizes the Drell-Yan reaction in proton+proton and proton+deuteron scatterings.

E906/SeaQuest has started its measurement with the proton beam provided by FNAL. A test data taking was made in March and April of 2012 in order to check the performance of detector and beam. Then a main data taking is running since November 2013. The experiment has succeeded in extracting J/psi events for test and Drell-Yan events. It has been working on optimizing the detector and the beam. The data acquisition system, hodoscope and wire chamber of the E906/SeaQuest detector are ready for stable data taking. The trigger, the track-reconstruction algorithm and the beam intensity will be improved further to earn the required statistics in the rest of the main data taking.

### 研究目的

本研究は素粒子物理学の範疇に属し、陽子の内部構造の理解を目的としている。陽子は物質を構成する基本粒子として普遍的に存在しているが、短距離(短時間、高エネルギー)スケールではパートンの多体系という内部構造が生じる。パートンとはクォーク、反クォーク、グルーオンの総称である。陽子は強い相互作用で束縛された最も単純で安定な系であり、強い相互作用の性質を精査する対象として広く研究されている。近年の実験的・理論的な進展によりその複雑性が理解されつつあり、現行理論では原理を説明できない測定結果が多く発見されている。

本研究は特に陽子中の反クォークの存在量に着目する。強い相互作用のフレーバー対称性に基づいて、反アップクォークと反ダウンクォークの存在量は等しいと予想されていた。しかしこの対称性が大きく

破れている事が近年の実験で明らかになった[1]。反ダウンクォークは反アップクォークより最大で70%も多い。対称性の破れは新たな物理法則を発見する為に注目すべき現象である。この非対称性を説明すべく幾つかの理論的モデルが提唱されている[2]。その一つである中間子雲モデルによる予測は測定結果の傾向と一致するが、非対称度の絶対値やクォーク運動量への依存性は再現できない。

本研究は既存の実験データの10倍以上の統計的・系統的精度で非対称性を測定し、理論モデルとの比較から非対称性の起源を解明する。この為の実験が、アメリカフェルミ国立加速器研究所(FNAL)のE906/SeaQuest実験である。エネルギーが120 GeVの陽子ビームを用いて、ドレル-ヤン反応を測定する。この反応は、陽子と陽子の衝突において一方の陽子内のクォークともう一方の陽子内の反クォークが対

消滅してミューオン対を生じる反応である。陽子+陽子と陽子+重陽子でのドレル-ヤン反応の反応頻度を計測する事により、反クォーク分布のフレーバー非対称性を抽出する。

[1] Phys. Rev. D64 (2001) 052002

[2] Phys. Rept. 303 (1998) 183

## 研究経過

FNAL から陽子ビームの供給が始まり、E906/SeaQuest 実験はビーム実験を開始した。まず検出器とビームの性能を確認する為に、2012年3~4月に短期間のテスト実験を行なった。テスト結果に基づいて装置に必要な対策を施した後、2013年11月より主実験を進めている。目標とする統計精度を達成するには2年分のデータが必要であり、長期に効率良くデータを収集する為の下準備として、現在は検出器とビームの性能を最適化する段階に有る。検出器のサブシステムには、トリガー、データ収集システム、ホドスコープ、ワイヤーチェンバーが有る。

トリガーは、バックグラウンド事象を除外してドレル-ヤン反応事象だけを収集する為の電子回路である。まず収集したデータとシミュレーションを比較して、事象の取捨選択が設計通りに行なわれている事を確認した。また後述するビーム強度の問題により、更に効率の良いトリガー方法が必要である事が分かった。

データ収集システムは、ホドスコープやワイヤーチェンバーやビームモニターから事象ごとに信号を読み出して記録する。テスト実験において、各チャンネルからのデータ読み出しや記録装置への書き込みに想定以上の時間がかかり、必要な事象を記録し切れないという問題が生じた。読み出すデータ量を減らす様に読出装置を改良し、記録装置を並列化して書き込みを分散させる事で、問題を解決した。

ホドスコープは、粒子(ミューオン)の大まかな(約10cm)生成方向を測定する高速読出な検出器である。その測定に基づいて、個々の事象を収集するかどうかをトリガーが決定する。粒子の入射頻度が高い時に検出効率の低下が観測されたので、読出回

路(PMT base)を大電力化するという対策を行なった。

ワイヤーチェンバーは、粒子の生成方向を精密に(約500 $\mu\text{m}$ )測定する低速読出な検出器である。収集したデータを用いて検出効率と位置分解能を評価し、要求値をほぼ達成している事を確認した。また、1台のワイヤーチェンバー(第3層上部)で大きなクロストーク(隣接する読出チャンネルでの混線)が見られた。高電圧と読出の電子回路を改良してクロストークを低減する事に成功した。更に、粒子の入射頻度が高くなると第1層のワイヤーチェンバーで信号の重畳が発生したので、アップグレード用ワイヤーチェンバーの製作を進めている。

ビーム強度は、テスト実験で明らかになった第一の課題である。ビームは19nsごとに塊(バンチ)で検出器に入射される。テスト実験ではバンチあたりの陽子数が不安定であり、要求値(40,000個)を越えるバンチが頻繁に観測された。バンチ陽子数が大きくなるとバックグラウンド事象が増加して、ドレル-ヤン反応の測定が困難になる。従って、バンチ陽子数を精密に測定し、加速器の装置を調整してビーム強度を安定化するという対策を進めた。更に陽子の多過ぎるバンチを測定から除外する(trigger veto)という機能をデータ収集システムに追加した。

本研究課題では特にビーム強度の安定化と精密測定が重要である。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(バンチごと)に測定する装置(Cherenkov Counter)であり、もう一つは絶対値を低速(5sec内の積分値)に測定する装置(Fast Current Transformer, FCT)である。

Cherenkov Counter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。この装置を用いながら加速器を調整する事により、バンチ陽子数の安定性を改善した。安定性の指標であるduty factorは30%から60%へと向上している。また、この装置の信号を用いて、データ収集系はtrigger vetoを行なう。テスト実験の時点でバンチ陽子数が要求値を越えない割合は10%以下であったが、現在その割

合は約 70% まで改善された。

Fast Current Transformer 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。ビーム強度の安定化を進めた後に、この装置からのデータ読出とビーム強度絶対値の評価を開始する。これらの装置により、ドレル-ヤン反応の反応頻度を要求精度で測定する事が可能になる。

収集したデータの解析も進めている。ドレル-ヤン反応から生じたミュオン対は、ワイヤーチェンバーによってその検出面内の通過位置として測定される。データ解析では、測定された通過位置からミュオン対の飛跡を再構成し、ドレル-ヤン反応の運動学的量を導出する。様々な実験的誤差を検証する為に、2 種類の独立な飛跡再構成アルゴリズムを開発して結果を比較しながらデータを解析している。先ず、検出器と飛跡再構成アルゴリズムの性能が要求通りである事を確認する為に、性質の分かっている  $J/\psi$  共鳴を測定した。 $J/\psi$  共鳴のピーク幅から検出器の質量分解能を評価し、 $0.3 \text{ GeV}/c^2$  と要求値をほぼ達成している事を確認した。上記の改善を行なった後、2013 年 11 月に開始した主実験にて、トリガーの条件を変えて選択的にドレル-ヤン反応を計測できる事を確認した。

## 考察

研究経過で述べた通り、ビーム実験で得られた結果に基づいて検出器とビームに必要な改善を施した。データ収集システム、ホドスコープ、ワイヤーチェンバーは必要な性能を既に満たしており、安定したデータ収集を開始できる状態にある。

ビーム強度の不安定性は改善すべき課題である。ビーム強度の大きいパンチを除外する事でドレル-ヤン反応の測定は行なえるが、除外した分だけ最終的な統計精度が悪化してしまう。加速器の装置を改善して、全ての入射ビームを測定できる様な測定条件を実現すべきである。加速器運転グループと協力して、電磁石の電源にノイズ抑制回路を取り付けたり、加速用電場のパラメータ (周波数など) を再調整したりと言った対策を進めている。

トリガーには未だ性能改善の余地が有る。トリガーの改善により、一定のビーム量からより多くのドレル-ヤン反応事象を記録できる事になるので、ビーム強度の不安定性によるデータ損失を補えるという利点がある。バックグラウンド事象が観測されやすい条件を実際のデータから探し出し、それを除外する様にトリガーの事象選択方法を調節している。同様に、飛跡再構成アルゴリズムにも未だ性能改善が見込め、一定の記録データからより多くのドレル-ヤン反応事象を抽出できる事になる。測定データにはドレル-ヤン反応以外で生じたミュオンが含まれているので、それら不要なミュオンを除外して効率良くドレル-ヤン反応を抽出する為に、データ解析手法を開発中である。

加速器設備の保守の為に 2014 年 8 月から 2 ヶ月弱でビーム実験を中断する。その期間にビーム強度測定器 (Fast Current Transformer) のセットアップを行ない、トリガーと飛跡再構成アルゴリズムの最適化を完了させる。そしてビーム実験を再開して 1 年間強に渡ってデータ収集を続け、反クォーク分布のフレーバー非対称性を決定する。

## 研究の発表

### 口頭発表

1. "フェルミ研ドレル・ヤン実験 SeaQuest のテストラン結果", 宮坂翔, 柴田利明, 中野健一, Florian Sanftl, 後藤雄二, 澤田真也, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012.09.11-14 / 京都産業大
2. "Construction of Drift Chambers for Drell-Yan Measurement at FNAL SeaQuest", K. Nakano, S. Miyasaka, K. Nagai and S. Obata, International Symposium "Nanoscience and Quantum Physics 2012" (nanoPHYS'12), 2012.12.17-19, 東京国際交流館
3. "Status of Fermilab Drell-Yan Experiment 'SeaQuest'", K. Nakano, KEK theory center J-PARC branch workshop on Hadron-structure physics at J-PARC and related topics, 2013.03.18, KEK Tokai Campus, Japan
4. "フェルミ研ドレル・ヤン実験 SeaQuest のためのドリフトチェンバーの製作とテスト", 永井慧, 柴田利明, 中野健一, Florian Sanftl, 宮坂翔, 小畑

滋希, 後藤雄二, 澤田真也, 宮地義之, 工藤優弥, 他 SeaQuest Collaboration, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013.03.26-29, 広島大学 東広島キャンパス

5. "フェルミ研ドレル・ヤン実験 SeaQuest の実験計画", 宮坂翔, 小畑滋希, 工藤優弥, 後藤雄二, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013.03.26-29, 広島大学 東広島キャンパス
6. "フェルミ研 SeaQuest 実験のコミッショニング結果と今後の実験計画", 澤田真也, 小畑滋希, 後藤雄二, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧, 中野健一, 宮坂翔, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013.09.20-23, 高知大学 朝倉キャンパス
7. "Status of Physics Run of Fermilab SeaQuest Experiment", K. Nakano, Meeting on High-energy hadron physics at J-PARC, 2014.02.13, KEK Tokai Campus, Japan
8. "SeaQuest の本実験ビームタイムのスタートと実験の進行状況 I", 永井慧, 小畑滋希, 後藤雄二, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 中野健一, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014.03.27-30, 東海大学 湘南キャンパス
9. "SeaQuest の本実験ビームタイムのスタートと実験の進行状況 II", 宮坂翔, 小畑滋希, 後藤雄二, 澤田真也, Florian Sanftl, 柴田利明, 永井慧,

中野健一, 宮地義之, 他 SeaQuest Collaboration, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014.03.27-30, 東海大学 湘南キャンパス

10. "Experimental study with Drell-Yan process", Kenichi Nakano, 日本物理学会 第 69 回年次大会 シンポジウム "核子構造研究の最新結果と将来計画 ～核子のスピン和の理解へ向けて～", 2014.03.27-30, 東海大学 湘南キャンパス

#### 誌上発表

1. "Measurement of flavor asymmetry of light quark sea of the proton in the E906/SeaQuest Drell-Yan experiment", S. Miyasaka, Y. Goto, Y. Miyachi, K. Nakano, F. Sanftl, S. Sawada, T.-A. Shibata and S. Takeuchi, RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol. 45, p. 50 (2012)
2. "Drift chamber construction for Drell-Yan measurement in SeaQuest experiment at Fermilab", K.Nagai, S.Obata, Y.Kudo, S.Miyasaka, Y.Goto, Y.Miyachi, K.Nakano, F.Sanftl, S.Sawada, and T.-A.Shibata, RIKEN Accel. Prog. Rep, Vol.46, p. 206 (2013)
3. "Results of the commissioning run of E906/SeaQuest Drell-Yan experiment at the Fermilab", S. Miyasaka, Y. Goto, Y. Kudo, Y. Miyachi, K. Nagai, K. Nakano, S. Obata, F. Sanftl, S. Sawada, and T.-A. Shibata, RIKEN Accel. Prog. Rep., Vol. 46, p. 78 (2013)