

機関番号：82118

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2006～2010

課題番号：18GS0210

研究課題名（和文） 偏極陽子衝突を用いた核子スピン構造研究の新展開

研究課題名（英文） New Developments in the Investigation of the Nucleon Spin Structure with Spin Polarized Proton Collisions

研究代表者

齊藤 直人 (SAITO NAOHITO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：20321763

研究成果の概要(和文):我々自身を含むすべての物質の基本構成要素である陽子の成り立ちを、素粒子の重要な性質である「スピン」という観点から理解する為、世界で唯一の偏極陽子衝突型加速器を用いた実験 PHENIX に、必要事象のみを選択的に収集するシステムを構築した。このシステムにより、世界で初めて、偏極陽子衝突におけるウィークボゾン生成実験を実現し、陽子のスピン構造研究に「海クォークの直接測定」という新たな局面をもたらすことが出来た。

研究成果の概要(英文): We have developed an event selection system for PHENIX experiment at the only polarized proton-proton collider in the world. The main purpose of the project is to understand the structure of the proton, which is the fundamental constituents of the matter, which includes ourselves, from the viewpoint of the important characteristic of an elementary particle, spin. This new system has opened a new era of the proton spin-structure studies to measure the spin polarization of sea quarks directly, by means of weak boson production in polarized proton-proton collision for the first time in the world.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	21,500,000	6,450,000	27,950,000
2007年度	74,400,000	22,320,000	96,720,000
2008年度	75,200,000	22,560,000	97,760,000
2009年度	22,700,000	6,810,000	29,510,000
2010年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
総計	202,200,000	60,660,000	262,860,000

研究分野：素粒子・原子核物理学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：スピン、核子構造、クォーク、強い相互作用、弱い相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

核子（陽子と中性子の総称）のスピンはクォークのスピンで説明できると考えられていたが、実際には20%程度しか説明できない。とりわけ不思議なのは、核子の量子数には寄与しないはずの海クォークが核子とは反対向きに偏極しているように見えることである。

一方で、電磁相互作用をプローブにする従

来のスピン構造研究ではクォークと反クォークを分離できないため、分離可能なWボゾンによる研究が待ち望まれていた。



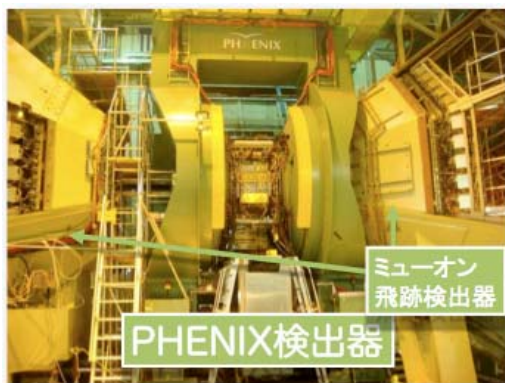
## 2. 研究の目的

海クォークが親の核子に対してどちら向きに偏極しているのかを、Wボゾンの生成を通して直接測定する。核子の量子数には寄与していないはずの反クォークが間接測定から示唆されるように本当に核子と反対向きにスピン偏極しているのか？この基本的な問に直接測定をもって解答をあたえるのが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

陽子-陽子衝突におけるW生成では、その生成に関与するクォーク・反クォークのスピンの向きが決まっています、フレーバーもほぼ固定しているので、核子のスピンのフレーバー構造を調べる上で最適のプローブであると言える。というのも、我々が実験的に制御出来るのは、核子のスピン偏極だけであるが、W生成を用いることで親の核子のスピン方向と反応に関与したクォークのスピン方向の関係を、フレーバーを特定して知ることが出来るからである。

一方、我々は米国ブルックヘブン国立研究所のRHIC加速器に陽子のスピン偏極をコントロールする機器を整備して世界で唯一の偏極陽子衝突型加速器を実現して来た。ここで、最高エネルギーの重心系 500 GeV での衝突を実現することにより、Wの生成が可能になる。W生成反応は高運動量のミュオン生成により同定されるが、我々の検出器 PHENIX には 10 MHz で起こる雑多な事象の中からそのような事象を選び出してデータ収集する機能がなかった。そこで本研究では、ミュオン飛跡検出器の情報をオンラインで取り出し、高運動量ミュオン、つまり磁場中で殆ど曲がらない飛跡を探し出す機能を導入してWの検出を可能にするものである。



## 4. 研究成果

W生成の研究を実現する為に、高運動量のミュオン発生事象の選択的なデータ収集を実現する。その為に、主に以下の2種類の

電子回路基板を開発し、導入した。

### 1) 波高増幅弁別回路基板

ミュオン飛跡検出器は、磁場中でのミュオンの飛跡を検出し、その曲率から運動量を特定するものであるが、その信号の約5%を取り出し、増幅して波高弁別を行い、その結果を光ファイバーで送るのがこの回路基板の役割である。アナログとデジタルの両方を含むボードであるのでノイズの低減など慎重な設計が必要なボードであるので、以下のようなステップで開発を進めた。

\* テスト用飛跡検出器を用いて宇宙線を用いての試験

\* 東北大学核理研でのビームを用いた試験

\* PHENIX 検出器で少数の実地試験

(宇宙線試験およびビーム試験)

それぞれの段階で改良を施し最終版を確定し、外部委員による評価委員会を経て、大量生産に踏み切った。

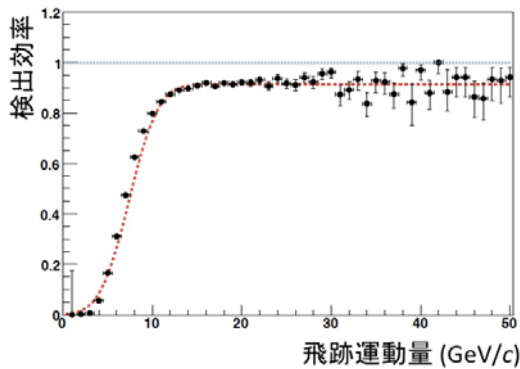
### 2) 高速データフォーマッター回路基板

上の波高増幅弁別回路基板の情報を取りまとめて PHENIX のデータ収集システムに合流させるべく、データフォーマッターを高速で行うのが本回路基板である。CERN LHC の ATLAS グループの協力を得て非常に短時間で開発し、実地試験結果の外部委員による評価委員会を経て、最終版を大量生産した。

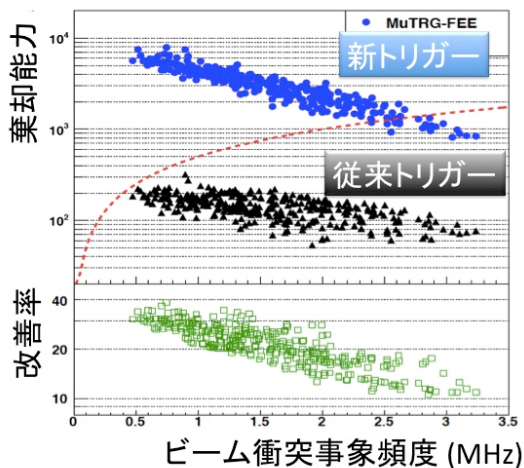


大量の電子回路基板の生産、設置、試験は平成 20 年度の夏から行われ、2009 年のデータ収集ラン (Run 9 と呼ぶ) に間に合うように行った。その過程で、ミュオン飛跡検出器のパフォーマンスを向上させるなどの副次的成果も生み出した。

平成 21 年 4 月まで最高エネルギーでのデータ収集が初めて行われ、その結果、飛跡の検出効率として、下図に示す通り期待通りの高い値を得ている。



この検出効率とともに重要なのは、不必要な事象データをどの程度棄却出来たかということである。下図に示すように、我々の導入した事象選択システムの棄却能力は、従来に比して一桁以上改善しており、十分なパフォーマンスを示した。

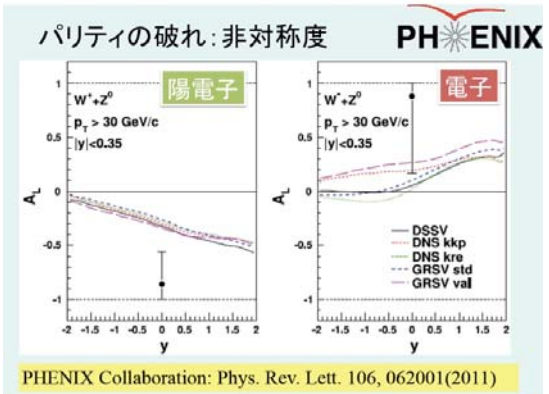


一方で、ビームの衝突事象頻度が高くなるとその改善率も限定的になることが分かった。これについては、我々の研究と平行して進められた米国グループの研究による RPC という検出器の導入により、時間的な制限をきつくすることで対処している。さらに、改善率の悪化の原因であるビーム起源のバックグラウンドを軽減する為に、コンクリートや鉄のシールドを加えた。

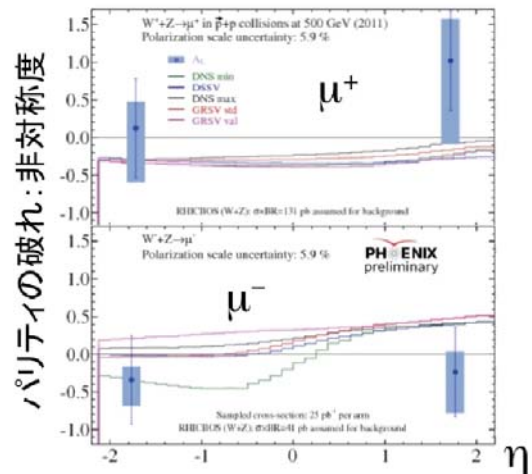
なお、我々が導入した事象選択システムについては、論文としてまとめて査読付き論文誌に投稿した。

物理結果は、Wボゾンの生成がパリティを破る弱い相互作用により起こる為、その破れ具合を表す非対称度として表すことが出来

る。その非対称度は、陽子中の海クォークがどの程度スピン偏極しているかによって、変わる。我々は、まずWボゾンが、電子または陽電子に崩壊するチャンネルを用いて、物理解析手法を確立し、結果を Physical Review Letter に投稿、掲載されている。



この確立した手法を、新しい事象選択システムの導入により可能になったミュオンへの崩壊チャンネルに適用し、非対称度を予備的な結果として求めた。これを、日本物理学会および国際会議などで発表している。下図に示すように、統計が十分とは言えない状態にあるのは、加速器のパフォーマンスが充実していない為である。しかし、ここから2-3年で大きく改善することが見込まれ、我々の導入した新システムの真価が現れることになる。



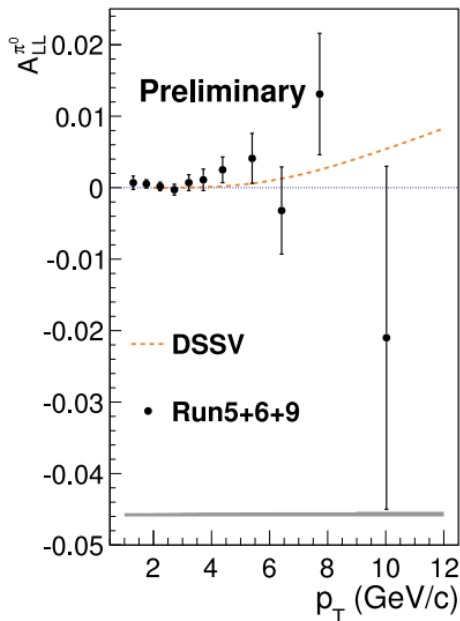
我々が導入したシステムを末永く使えるようにする為に、本格的運用の経験を積み上げ、とくにトリガーを安定的に稼働させる為の必須パラメータセット、チェンバーの電圧、ディスクリミネータの閾値、時間遅延など、その設定方法/安定性のモニターを含めて改良を行い、完結させた。また、今後の維持管理のために、操作・診断手順などについて、文書化を進めた。



なお、このシステムの最終評価を行う委員会を開催予定期間に、震災があった為、研究費の繰り越しを申請して認めて頂いた。研究体制の復旧時間が不透明だった為、一同に合せずとも評価出来るよう、システムの概要とそのパフォーマンスについて、予定より詳しく論文にまとめた。その内容は国際会議などで発表し、共同研究者全員が見られる技術レポートとして公開、更にその圧縮版を査読付き論文誌に投稿したことは上でも述べた通りである。

また、物理解析についても、上述の予備的結果を更に最終型にするべく、進めている。今後は、統計を増やしてモデルの選別に踏み込める予定である。さらに、これまでクォーク同士を結びつけている糊の役割をするグルーオンの偏極が核子にどれだけ寄与しているかを調べて来たので、“海”と“糊”の関係について強い相互作用の基礎理論 量子色力学にもとづく解析を行って発表する予定である。

下に示したのは、我々が過去に確立した手法を用いてデータの精密化がすすむ、中性パイ中間子生成の、陽子偏極状態に依存するスピン非対称度  $A_{LL}^{p_0}$  である。



この運動学的領域の中性パイ中間子は、主にグルーオンが関与する反応により生成される。従って、グルーオンが偏極しているならば、この非対称度が有限な値として得られるはずである。ご覧のように、精度を上げて測るにつれ、非対称度が大きくないことが分かってきている。これにより、過去に非常に大きな偏極を予言した物理モデルを、既に棄却してきている。今後、「海クォーク」の偏極を  $W$  生成のデータを通じて精密化し、「糊」

と「海」の関係を論ずる基盤を構築したと言える。

成果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 高運動量のミュオン生成事象を選択的にデータ収集するためのトリガーシステムを構築した。
  - (2) 段階的導入により、デザインを最適化して設置することができ、さらに実際の運用を通して運転パラメータを最適化した。その結果、設計通りのパフォーマンスが得られた。
  - (3) 一方で、ビームの衝突頻度増加と智に、パフォーマンスの悪化が観測された。付加的な検出器やシールドを援用して、所定のパフォーマンスを得ている。
- (1) ~ (3) の成果は、技術系論文誌に投稿した。
- (4) 偏極陽子衝突における  $W$  生成測定を、電子または陽電子への崩壊過程を通じて、世界で初めて成功させ、論文としてまとめた。
  - (5) 新しい事象選択システムを用いて収集したミュオンへの崩壊過程のデータを解析し、予備的結果として国際会議などで発表した。投稿論文を準備中である。
  - (6) 今後の継続的な運転に耐えるよう、システムのバグだし、改善を行った。また、文書化を行った。
  - (7) グルーオンの偏極に敏感な反応などと合わせて核子のスピン構造をグローバルに議論出来る枠組みを構築した。

## 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 3 2 件)

- ① A. Adare, K. Kurita, T. Murakami, J. Murata, N. Saito, K. Tanida, ほか  
Physical Review Letter 106 (2011) 062001
- ② A. Adare, K. Kurita, T. Murakami, J. Murata, N. Saito, K. Tanida, ほか  
Physical Review D79 (2009) 012003
- ③ A. Adare, K. Kurita, T. Murakami, J. Murata, N. Saito, K. Tanida, ほか  
Physical Review Letter 103 (2009) 012003

[学会発表] (計 2 2 件)

- ① 中川 格 (NAKAGAWA ITARU)

Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics, June 24, 2011, オーストラリア・アデレード大学

- ② 深尾 祥紀 (FUKAO YOSHINORI)  
BNL W Physics Workshop, June 24-25, 2010
- ③ 齊藤 直人 (NAOHITO SAITO)  
XXIX International Symposium on Physics in Collision, August 30-September 2, 2009 神戸大学

[その他]

ホームページ等

実験のホームページ

<http://www.phenix.bnl.gov>

W生成に関する論文発表のページ

[http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR\\_display.asp?prID=1232](http://www.bnl.gov/bnlweb/pubaf/pr/PR_display.asp?prID=1232)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

齊藤 直人 (SAITO NAOHITO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号：20321763

### (2) 研究分担者

村上 哲也 (MURAKAMI TETSUYA)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50219896

村田 次郎 (MURATA JIRO)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：50360649

竹谷 篤 (TAKETANI ATSUSHI)

理化学研究所・延與放射線研究室・前任研究員

研究者番号：30222095

(H21～連携研究者)

栗田 和好 (KURITA KAZUYOSHI)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：90234559

(H20～連携研究者)

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

谷田 聖 (TANIDA KIYOSHI)

ソウル大学・准教授

以上。