

# 論文内容要旨 (和文)

平成 26 年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学 専攻 物理学 分野

氏 名 糠塚 元気



## 論文題目

First measurement of transverse spin asymmetry on the polarised Drell-Yan  
(偏極ドレル・ヤン過程による横スピン非対称度の測定)

本論文は量子色力学 (QCD) に基づいた核子の内部構造に関する実験による研究である。

クォークの提唱・実験的発見以来、核子のパートンレベルでの内部構造は QCD 非摂動領域の問題として理論・実験の両面から精力的に研究されているが、多くの未解決問題を残している。なかでも核子スピンの成り立ち——すなわち核子のスピン構造:  $1/2 = \Delta\Sigma/2 + \Delta G + L$  におけるクォークスピン寄与  $\Delta\Sigma/2$ , グルーオンスピン寄与  $\Delta G$ , クォーク・グルーオンの軌道回転の寄与  $L$ ——は根源的な問題のひとつだが、1988 年の EMC による報告に端緒を開いた「陽子スピンの危機 (Proton spin crisis)」から 30 年余り経過した現在でも完全な理解には至っていない。

核子の構造は Leading twist において 8 つのパートン分布関数 (PDFs) で記述される。このうち 5 つはパートンの横方向運動量  $k_T$  に依存する関数 (Transverse Momentum Dependent PDFs, TMD-PDFs) である。Sivers 関数は  $k_T$  と核子スピンの横方向成分の相関を記述する TMD-PDFs のひとつであり、値の有無はパートンの軌道角運動の存在に関わる。ゆえに Sivers 関数の測定は  $L_z$  の有無につながる。また、Sivers 関数は準包括的深非弾性散乱 ( $l + N \rightarrow l' + h + X$ ) とドレル・ヤン (DY) 過程 ( $q + \bar{q} \rightarrow l + \bar{l}$ ) で符号が反転すると理論的に予言されている。核子構造を TMD-PDFs で理解する理論的な枠組みはこの予言の確認なくして確立されないが、技術的な難しさのため DY 過程による Sivers 関数の測定は未だ行われていなかった。

COMPASS 国際共同プロジェクトは 13 カ国から 200 人以上の研究者と学生が参加しており、実験による核子構造とハドロンスペクトロスコピーの研究を行っている。CERN の Super Proton Synchrotron から供給されるミューオン・ハドロンビームと固定標的を使用し、全長 60 m のスペクトロメータで生成・散乱粒子をとらえる。本論文では運動量 190 GeV/c の  $\pi^-$  ビームと、ビームに対し横偏極した陽子標的による偏極 DY 過程  $\pi^- + p \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$  による  $\mu^+\mu^-$  粒子対 (dimuon) 角度分布を COMPASS スペクトロメータ測定し、標的の偏極の向き関する方位角・天頂角の非対称度を求めた。偏極標的として固体アンモニア ( $\text{NH}_3$ ) 中の水素原子核に対して、動的核偏極法を用いて最大 80% 程度まで偏極させたものを用いた。アンモニアを格納した 2 つのセルをビーム軸上に設置し、セルの一方を正偏極、他方を負偏極させた。これは同時に両方向の偏極 DY 過程を測定し、スペクトロメータの安定性による系統的な影響を排除するためである。スペクトロメータは基本的に従来と同じだが、本測定のため偏極標的の最適化を行い、ハドロンアブソーバ、シンチレーションファイバートラッカの vertex detector、新ドリフトチェンバーを新たに導入した。ハドロンアブソーバは、標的と反応しなかったビーム粒子や、2 次粒子が下流の検出器に与える影響をおさえるためのものである。ハドロンアブソーバにより生成  $\mu$  粒子が多重散乱を起こし、飛跡再構成に不確実性を与える。これを補うために vertex detector を偏極標的とハドロンアブソーバの間に設置した。新ドリフトチェンバーは経年劣化により性能が低下した検出器の補完のために導入した。測定で得られた非対称度は標的核子の (TMD-) PDF とビーム  $\pi^-$  の (TMD-) PDF の畳込み積分に比例するという解釈が与えられており、核子の TMD-PDF の情報が得られる。

2016 年に 6 ヶ月間のデータ収集を行い、約 750 TB のデータを収集した。このデータから粒子の飛跡、反応

点の再構成を行い、偏極 DY 過程による dimuon 事象を選択した。dimuon 事象の選択には、測定で得られた dimuon 不変質量分布をモンテカルロシミュレーションで再現し、偏極 DY 過程が得られたイベントの 96% を占める領域  $4.3 \text{ GeV}/c^2$  から  $8.5 \text{ GeV}/c^2$  を選択した。このデータに対して Extended Unbinned Maximum Likelihood 法を用いて非対称度を抽出した。非対称度は標的核子・ビーム粒子の Bjorken  $x$ , Feynman  $x$ , 仮想光子の横運動量, dimuon 不変質量それぞれの変数に対して得た。得られた非対称度から、陽子の Sivvers 関数, Pretzelosity 関数, Transversity 関数と  $\pi^-$  粒子の数密度関数 (いわゆる PDF) と Boer-Mulders 関数の情報を抽出することができる。また、これらの変数を全て積分したときの非対称度も求めた。核子の Sivvers 関数に関わる非対称度の値は約 0.06 で、符号反転を適用した理論予測と誤差の範囲で一致する。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 30 年 2 月 6 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 岩田 高広

副査 宮地 義之

副査 亀田 恭男

副査

副査



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	地球共生圏科学専攻・物理学分野		鎌塚 元気
論文題目	First measurement of transverse spin asymmetry on the polarised Drell-Yan (偏極ドレル・ヤン過程による 横スピン非対称度の測定)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成 30 年 1 月 30 日～ 平成 30 年 2 月 6 日
論文公聴会	平成 30 年 2 月 6 日	場 所	理学部 1 号館 13 番教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	平成 30 年 2 月 6 日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本論文は原子核を構成する核子（陽子および中性子）のスピン構造に関する実験的な研究について記述されたものである。スピン 1/2 を持つ核子は下部構造として基本粒子であるクォーク（スピン 1/2）が強い相互作用を媒介するグルーオン（スピン 1）をやりとりして結合した複合粒子とみなされている。この時、従来のクォークモデルではクォークの軌道回転を考えず、核子のスピンはクォークのスピンに寄与によるとされている。これまでの実験では主にレプトンビームによる深部非弾性散乱や陽子・陽子衝突による実験的な研究によってクォークのスピンに寄与が詳しく調べられてきたが、核子のスピンに関する微細構造は未だに解明されていない。

本研究は、従来のクォークモデルでは考慮されていない、クォークの軌道回転の寄与を探ることを目的として初めてドレル・ヤン過程での測定に挑戦したものである。ヨーロッパ原子核研究機構（CERN）の COMPASS 実験において、 $\pi$  中間子ビームをスピン偏極した陽子標的に入射し、終状態にミュオン対をとらえ、ドレル・ヤン過程でのスピン非対称度の測定を行った、本論文はその全体をまとめたものである。英語で 114 ページに渡って記述され、1, 2 章において核子スピン構造に関する導入とこの分野の理論や実験についての概説、3 章に COMPASS 実験の詳細、5 章にデータ解析、6 章に結果と考察、7 章に結論が示されている。特に、本研究での重要な偏極ターゲットの構造や運転法、データ解析の基礎となるシミュレーション、非対称度を求める際の系統誤差の推定の方法などについて詳しく記述されている。

本論文の審査では主に研究の重要性、オリジナリティ、研究分野へのインパクト等を調べ審査基準に従って判定を行った。本研究によってドレル・ヤン反応でのスピン非対称度が世界で初めて測定され、得られたスピン非対称度の 1 つである Sivers 非対称度はクォークの軌道角運動量の存在を認める理論と矛盾しない値を示していた。本研究はそれを初めて実証したオリジナリティの高い研究だと高く評価できる。また、この結果は物理学分野でのトップジャーナルの一つである Physical Review Letters 誌にも掲載されており、この研究分野へのインパクトが大きさが示されている。上記のように十分に判定基準を満たしており、合格と判断した。

なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

博士論文公聴会後に主査、副査と申請者との 30 分程度の面接において質疑応答を行った結果、当該研究内容について深く理解し、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判定し、合格といたしました。