

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14729

研究課題名（和文）偏極ドレル・ヤン過程による陽子スピンとクォーク運動量相関の研究

研究課題名（英文）Study of correlation between proton spin and quark momentum in the polarized Drell-Yan process

研究代表者

糠塚 元気 (Nukazuka, Genki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・理研BNLセンター研究員

研究者番号：00824864

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は CERN COMPASS 国際共同研究が 2015、2018 年に行った偏極ドレル・ヤン (DY) 測定データを解析し、標的陽子の横スピンに依存した構造、特に Sivers 分布と呼ばれる横偏極陽子中のクォークの横方向運動量の相関を記述する分布関数の研究である。DY データからの背景事象の排除、DY 過程による μ ・反 μ 粒子対の選択、標的陽子の偏極度解析などのあと μ ・反 μ 粒子対角度分布の非対称度を抽出した。Sivers 分布に関する非対称度は +0.05 で、陽子構造の 3 次元的記述をする理論的な枠組みの正当性を支持するものであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陽子は最も身近な物質粒子の一つだが解明されていない謎がいくつも残されており、陽子スピン 1/2 の期限もその一つである。クォーク、グルーオンで陽子スピンは構成されるが、それぞれのスピンだけではなく軌道角運動量も寄与しうる。陽子構造の立体的な記述は軌道角運動量の理解に必要で、本研究による Sivers 非対称度の符号は運動量空間を 3 次元に拡張する理論的な枠組みによる予言を支持するものであった。すなわち、我々の陽子内のクォークの 3 次元的運動量の理解が正しいという大きな証拠が得られ、陽子構造の理解が大きく進歩したことを意味する。

研究成果の概要（英文）：This is research on proton structure by using the so-called polarized Drell-Yan (DY) process obtained by COMPASS collaboration at CERN in 2015 and 2018. This research focused on the Sivers parton distribution function, which describes the transverse momentum distribution of unpolarized partons in a transversely polarized proton. In the data analysis, elimination of background events, selection of muon-antimuon pair (dimuon) produced by the DY process, polarization determination of the target protons, and so on were performed. After the processes, dimuon angular asymmetries were extracted. One of the asymmetries related to Sivers distribution was found to be about +0.05. The result agrees with the theoretical framework describing the 3-dimensional momentum structure of a proton.

研究分野：原子核実験

キーワード：核子構造 高エネルギーQCD 陽子スピンの起源 ドレル・ヤン過程 偏極標的

1. 研究開始当初の背景

最も身近な物質粒子である陽子には多くの謎が残されており、陽子スピン $1/2$ の起源もその一つである。陽子スピンは構成粒子であるクォークとグルーオンによって構成されるはずだが、クォーク、グルーオン自身のスピンだけでなく、クォークやグルーオンの軌道角運動量も寄与している可能性が示唆されている。陽子構造をクォークレベルで記述するパートン分布関数 (**Parton Distribution Functions, PDF**) を 3 次元的なクォーク運動量空間に拡張した **TMDs (Transverse Momentum Dependent PDFs)** という理論的な枠組みが提唱されており、**TMDs** とクォーク、グルーオンの軌道角運動量の関係性が指摘されている。

2. 研究の目的

本研究ではクォークの軌道角運動量の寄与を調べる。

TMDs の中で最も有名な **Sivers** 分布は陽子の横スピンとのクォークの横方向運動量の相関を記述するもので、陽子スピンに対するクォーク横運動量の偏りと解釈できる。もし **Sivers** 分布の値が 0 でなければ、陽子スピンの向きに依存したクォーク横運動量が存在し、クォークの軌道角運動量の存在を示唆する。摂動論的量子色力学によると **Sivers** 分布の符号は準包含的深非弾性散乱 (**SIDIS**) と偏極ドレル・ヤン (**DY**) とで反転すると予言され、この予言の確認は **TMDs** の正当性を示す試金石である。

Sivers 分布はすでに **SIDIS** を介した測定が行われており、 0 でない **Sivers** 非対称度が報告されているが、非対称度から **Sivers** 分布の抽出にはクォークの破砕化を扱う必要があり、破砕関数の不定性が必ず含まれる。一方、**DY** 過程は純粋な電磁相互作用でクォークの破砕は関与しないため、**Sivers** 分布の抽出には理想的な反応である。本研究は偏極 **DY** 過程を介した **Sivers** 非対称度を測定し、**SIDIS** による実験結果や理論予測との比較から **TMDs** の正当性を示し、クォークの軌道角運動量の存在を確かめる。

3. 研究の方法

CERN COMPASS において行った偏極 **DY** 過程 $\pi^- + p^\uparrow \rightarrow \gamma^* + X \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ の測定データから $\mu^+\mu^-$ 粒子対 (**dimuon**) の角度分布を解析し、**Sivers** 非対称度を得る。ここで π^- は **CERN SPS** から供給される運動量 $190 \text{ GeV}/c$ の 2 次粒子ビームである。 p^\uparrow は固体アンモニア (**NH₃**) 中の水素原子核 (**¹H**) をビームに対して垂直方向 (横方向) にスピン偏極させた固定偏極標的 (**PT**) である。この非対称度は標的陽子の **Sivers** 分布とビーム π^- 粒子の **PDF** の畳込み積分に比例するという理論的解釈が与えられている。 $p(uud)$ への $\pi^-(u\bar{d})$ 入射の **DY** 過程を扱うため、**u** クォークに感度を持った測定になり、**COMPASS** スペクトロメータは価クォーク領域の運動量を持ったクォークによる **DY** 過程に感度があるため、非対称度から標的陽子中の陽子の価 **u** クォークの **Sivers** 分布が得られる。

実験は **2015**、**2018** 年に行っており、解析すべきデータは既に得られていた。先行研究の解析手法から初め、**2018** 年のデータに最適化したデータ選択を確立させる。測定した **dimuon** は **DY** 過程以外にも J/ψ や ψ' の崩壊、**open-charm** 過程も含まれている。**2018** 年データに最適化させたモンテカルロシミュレーションを行い、**dimuon** 不変質量分布から **DY** 過程の割合とデータ数のバランスが最も良い領域を見積もり、純度の高い **DY** イベントを選択する。また、**2018** 年の標的偏極度も解析し、物理データ解析に組み込む。最終段階として **2015**、**2018** 年の両データの **DY dimuon** の角度分布から **Sivers** 非対称度を得る。

4. 研究成果

(1) 2018 年ランでの **PT** の偏極度解析

Sivers 非対称度を得るためには陽子の偏極状態を知る必要があり、標的の偏極度解析は **DY** 過程の初期状態に関わる重要な役割を持つ。

固体アンモニア中の水素原子核をスピン偏極させ、標的として使用した。偏極に必要な高磁場、極低温は **COMPASS PT** マグネット (ソレノイド縦磁場モード 2.5 T 、ダイポール横磁場モード 0.6 T) と $^3\text{He}/^4\text{He}$ 希釈冷凍機 (到達温度約 60 mK 、数 100 mK 下での冷却能力 350 mW) で実現した。高偏極度を達成するためにマイクロ波照射による動的核偏極法 (**DNP**) を採用し、2 つのセルに分けて格納した標的の一方を正、他方を負の方向に偏極させ、実験に使用した。

標的粒子のスピンが揃っている程度は偏極度で表され、偏極目的核の原子核共鳴 (**Nuclear Magnetic Resonance, NMR**) 信号の大きさは偏極度と比例する。熱平衡状態でのスピン状態はボルツマン分布で表されることを利用し、熱平衡状態の **NMR** 信号面積の測定値と、ボルツマン分布による偏極度と対応から較正係数を決定した。**DNP** 時の偏極度はその時の **NMR** 信号面積と較正係数を用いて得た。図 1 は **2015**、**2018** 年ランにおける標的偏極度を時間の関数で表しており、赤 (黒) 点は上流 (下流) セル内の標的偏極度を表す。偏極や

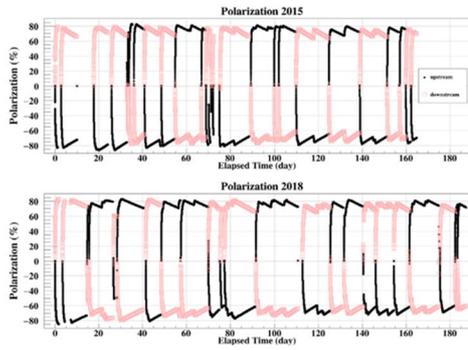


図 1 2015, 2018 年ランにおける標的偏極度。横軸は時間を表し、赤（黒）点は上流（下流）セルを表す。

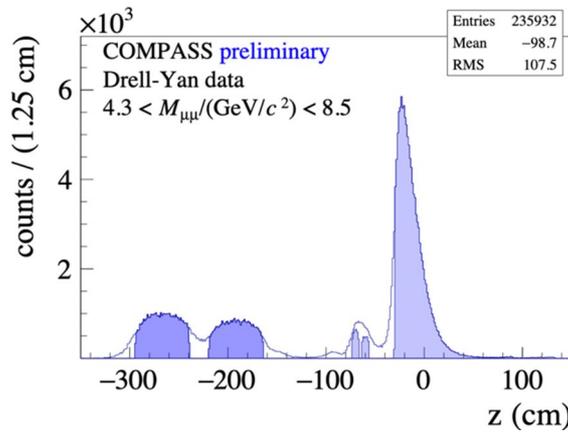


図 2 反応点のビーム軸方向の位置分布。

-300 ~ -200 cm にある 2 つの山が PT セルに対応する。

偏極度測定は 2.5 T ソレノイド縦磁場モードで行った。実験データ収集時は 0.6 T ダイポール横磁場モードで偏極方向をビームに対して垂直に保つ必要があったが、偏極度測定は磁場の違いのため行わなかった。実験データ収集時の偏極度はデータ収集の直前、直後の偏極度を使い、減衰関数の内挿で決定した。表 1 には 2015, 2018 年ランでの標的セルごと、偏極方向ごとの最高偏極度とデータ収集中の平均偏極度がまとめてある。

この結果をデータベース化し、Sivers 非対称度抽出に用いた。この偏極度解析の結果は論文としてまとめて出版した[1]。

表 1 2015, 2018 年ランにおける偏極標的の最大偏極度と物理データ収集時の平均偏極度。

Year	Cell	Maximum polarization (%)	Average polarization over the physics data taking (%)
2015	Upstream	82.7, -86.0	74.2, -71.4
2015	Downstream	79.3, -77.8	69.2, -67.0
2018	Upstream	82.9, -84.7	76.3, -68.3
2018	Downstream	82.0, -80.0	73.6, -68.5

(2) 非対称度解析

2015 年, 2018 年に COMPASS で行った偏極 DY 過程 $\pi^- + p^\uparrow \rightarrow \gamma^* + X \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ の測定データを使用した。データ解析は先行研究 [2] の手法をもとにし、dimuon の選択では

- Dimuon 用トリガーのかかったイベントの選択
- イベント反応点が偏極標的のセル内（図 2, -300 ~ -200 cm にある 2 つの山）にあるものの選択
- μ 粒子の飛跡とトリガーをかけたホドスコープに矛盾のないものの選択
- 測定データが時間的に不安定だったものの排除

などを行った。図 2 は反応点のビーム軸方向の位置分布が示してある。標的セルによる 2 つの山の他に、-100 cm 付近に設置した非偏極アルミニウム標的、-40 cm より下流にあるハドロンアブソーバーのタンゲステンコアによるピークがある。この分布のうち、色を塗った領域が物理の研究として使用でき、本研究では標的セルによる 2 つの山の領域のみを選択した。ビームや検出器の安定性はデータ収集に影響する。測定したパラメータは時間的に安定していたが、統計的に大きく外れたものをビーム単位、ラン単位（データ収集を約 2 時間で区切った単位）で排除し、質の高いデータセットのみを解析した。

このようにして dimuon イベントが得られたが、DY 過程の他に J/ψ や ψ' の崩壊、open-charm 過程も含まれている。DY による Dimuon イベントを多く保ったまま背景事

象の寄与を減らすため、**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、最適な選択領域を探した。図 3 は測定から得られた **dimuon** 不変質量分布 (黒), 再現した不変質量分布 (紫) とそれぞれの物理過程による寄与である [2]。 J/ψ や ψ' の崩壊, **open-charm** 過程による寄与はモンテカルロシミュレーションで見積もった。また、ビーム粒子の崩壊や、異なるイベントで生じた μ 粒子の組み合わせによる背景事象も測定に混入しうるが、これは測定データの $\mu^+\mu^+$ 対と $\mu^-\mu^-$ 対の量から見積もった (黒点線)。再現した不変質量分布は測定とよく一致し、**4.3 GeV/c²** から **8.5 GeV/c²** の領域を選ぶことで **DY** 以外の物理過程の寄与を **4%** 以下に抑えられることがわかった。図 3 は **2015** 年データに対する解析だが、**2018** 年データから得られた **dimuon** 不変質量分布も **2015** 年のものと同じ不変質量領域の選択が有効であることを確認した。

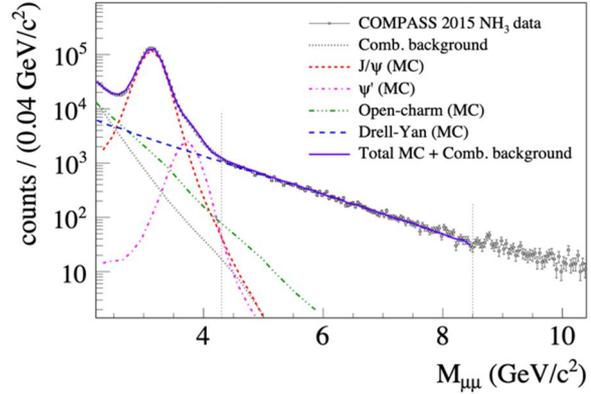


図 3 **2015** 年データから得られた **dimuon** 不変質量分布 (黒) とシミュレーションで再現したスペクトル (紫)。不変質量選択範囲は **4.3 GeV/c²** と **8.5 GeV/c²** にある点線で示してある。

DY 過程による **dimuon** イベントを用いて角度分布の非対称度を得る。非対称度は依存する角によって異なる物理的解釈が与えられており、注目する角のモジュレーション項の振幅が非対称度である。標的陽子の **Sivers** 分布に関連する **Sivers** 非対称度は、陽子スピンの横成分と **dimuon** の横運動量の間角 φ_S (図 4) に関連し、ビーム π^- 粒子の **PDF** との畳み込み積分に比例すると解釈される。他に存在する **6** つの非対称度と合わせ、標的の偏極度や **dilution factor**, **depolarization factor** の重みを付けた最尤法を用いて同時に抽出した。データ収集は約 **2** 週間の区切り (ピリオド) に分けて行っていたが、非対称度抽出もこの区切りごとに行い、結果の重み付き平均を最終的な値とした。ピリオドごとの非対

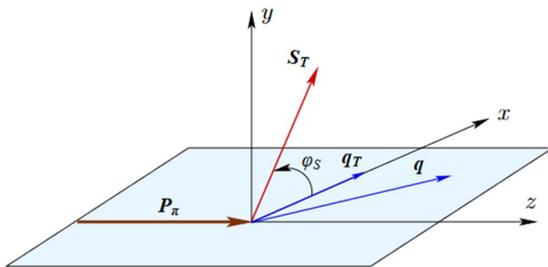


図 2 標的静止系における φ_S の定義。標的スピンの横成分 S_T と **dimuon** 横運動量 q_T の間の角が φ_S である。

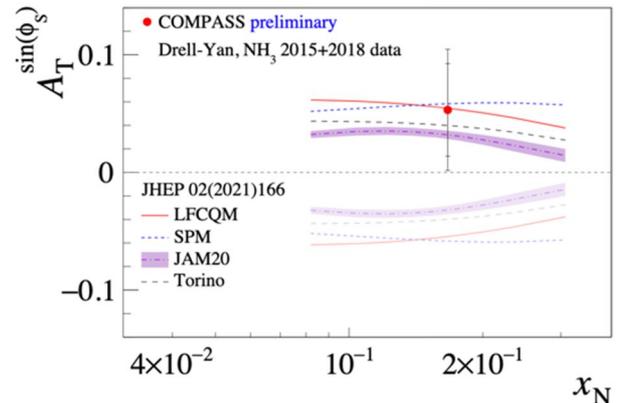


図 5 **2015**, **2018** 年ランをあわせて解析して得られた **Sivers** 非対称度 (赤点) と理論予測 (赤実線、青点線、紫帯) の比較。赤点にある **2** つの誤差棒はそれぞれ統計誤差、統計誤差と系統誤差の **2** 乗和を意味する。**Sivers** 分布の符号反転があるシナリオでは非対称度は正になり、実験結果は符号反転を支持している。

称度の比較も行い、大きな矛盾がないことを確認した。系統誤差見積りのため、非対称度

が **0** になるべきデータセット 例えば標的偏極度の平均が **0** になるようなデータセット
に対する非対称度抽出も行い,系統誤差が統計誤差の **0.7~1.2** 倍程度であることがわ
かった。図 **5** に **Sivers** 非対称度 (赤点) と統計誤差 (短い誤差棒), 統計・系統誤差 (長い
誤差棒) を示す。図 **5** の帯は理論予測を表し, 正の領域は **Sivers** 分布の符号反転を仮定
した場合, 負の領域は符号反転が無い場合のものである。実験結果は符号反転を仮定した理
論予測と一致し, 値も **0** から **1** 標準偏差離れていた。これは **TMDs** の正当性を支持する
証拠であり, 陽子構造の理解が確実に進展したことを意味する。

<引用文献>

- [1]. **Nuclear Instruments and Methods A, 1025, 2022, 166069.**
- [2]. **Physical Review Letters, 119, 2017, 112002.**

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Andrieux V., Berlin A., Doshita N., Finger M., Finger M., Gautheron F., Horikawa N., Ishimoto S., Iwata T., Kisselev Y., Koivuniemi J., Kondo K., Magnon A., Mallot G.K., Matoupek J., Matsuda T., Meyer W., Miyachi Y., Nukazuka G., Pepek M., Pires C., Quintans C., Reicherz G., Runkel St., Srnka A., Suzuki H.	4. 巻 1025
2. 論文標題 The large COMPASS polarized solid ammonia target for Drell-Yan measurements with a pion beam	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 166069 ~ 166069
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2021.166069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 糠塚元気	4. 巻 66
2. 論文標題 CERN COMPASS の偏極標的	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 126 ~ 136
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 糠塚元気, 他
2. 発表標題 CERN COMPASS における液体水素標的を用いた深非弾性散乱によるミュオン, 生成ハドロン方位角分布非対称度の測定
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 糠塚元気
2. 発表標題 CERN COMPASS の偏極標的
3. 学会等名 日本のスピン物理学の展望（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Nukazuka on behalf of the COMPASS Collaboration
2. 発表標題 Pion-induced Drell-Yan experiments with transversely polarized proton target in COMPASS at CERN
3. 学会等名 The 11th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 糠塚元気, 他
2. 発表標題 CERN・COMPASS におけるドレル・ヤン実験の解析状況
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020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
---------	---------