

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247032

研究課題名(和文) CERN-COMPASSでの核子スピンのQCD構造の研究

研究課題名(英文) Study on QCD structure of nucleon spin at CERN-COMPASS

研究代表者

岩田 高広 (Iwata, Takahiro)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：70211761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は核子スピンの分解の鍵となるクォーク軌道回転寄与の解明を目的としている。CERNのCOMPASSにおいて、陽子への負電荷中間子入射での偏極ドレリヤン反応の非対称度測定(偏極DY測定)を世界で初めて遂行した。結果は摂動QCDの予想に矛盾しておらず、クォークの軌道角運動量の存在を示唆していた。また、190GeVミューオンによる陽子に対する深部仮想コンプトン散乱(DVCS)に関する測定を行った。この結果は一般化されたクォーク分布(GPD)を抽出し、軌道回転寄与を定量的に与えるための重要な情報となる。

研究成果の概要(英文)：This study is on the orbital angular momentum(OAM) contribution of quarks to the nucleon spin, which is a key for the decomposition of the nucleon spin. We performed the first ever polarized Drell-Yan experiment to measure the asymmetry of the reaction with a negative charged pion beam incident on a polarized proton target. The results are consistent with the prediction of the perturbative QCD and suggest presence of the OAM. In addition, we performed a measurement for deeply virtual compton scattering(DVCS) with a 190GeV muon beam on a proton target to extract the generalized parton distribution(GPD) which is important information to study the OAM contribution.

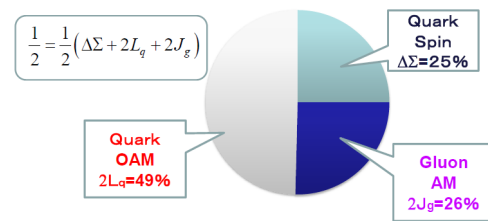
研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：核子スピン

1. 研究開始当初の背景

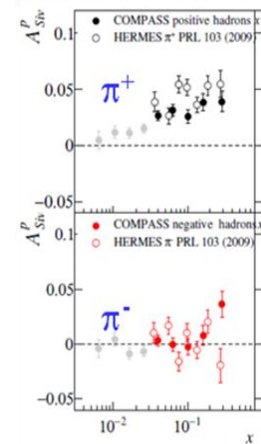
クォークモデルでは、核子はクォークによる複合系とみなされるが、QCDではクォーク(価クォークと海クォーク)がグルーオンによって結合した複合系で、そのスピンはクォークスピン寄与 $\Delta\Sigma$ 、グルーオンスピン寄与 ΔG およびクォークやグルーオンの軌道回転 $\langle L_q \rangle$ に分解される。ここで、クォークスピン寄与は深部非弾性散乱(DIS)を捉える私たちの実験によって $\Delta\Sigma = 20\% \square 25\%$ 程度と判明している(LSS: PRD 82, 114018 (2010))。さらに、私たちはCERNのCOMPASSやDESYのHERMESにおいてハドロンを同時計測するSemi-Inclusive-DIS反応(SI-DIS)を調べ、各フレーバーのスピン寄与[COMPASS, PLB 693 (2010) 227 など]など詳細な情報を与えた。また、COMPASSは世界最高精度のグルーオン偏極度測定(high-Pt-hadron過程)を実現し[COMPASS, PLB 633 (2006) 25]、バックグラウンドが少ないオープン・チャーム過程でもユニークな偏極度データを提供した[COMPASS, PLB 676 (2009)31, PRD 87 (2013) 052018]。その結果、グルーオン偏極度は0と矛盾しないことを見出し、**最後の候補である軌道回転寄与に注目が集まった**。この寄与のヒントはクォークの横運動量に依存したパートン分布(TMD-PDF)の中に見出される。中でもSivers関数 f_{1T}^\perp は核子スピンとクォーク横運動量(核子スピんに垂直)との相関を表し、 $f_{1T}^\perp \neq 0$ ならば軌道回転の存在証拠となる。 f_{1T}^\perp はビームに垂直に偏極した核子標的でのSI-DISにおいてハドロン方位角と核子スピンの角相関の変調(Sivers非対称度 A_{Siv})から決定される。HERMESは陽子に対して「 π^+ でnon-zeroの A_{Siv} 」を発見した(右図)[HERMES, PRL 103 (2009)]。これはCOMPASSでも確認し[COMPASS, PLB 717(2012) 383]、「non-zeroの A_{Siv} 」が確定した。また「重陽子では0と矛盾しない A_{Siv} 」が示され[COMPASS, PRL.94:202002,2005]、uとd-quarkの f_{1T}^\perp が逆符号で、それぞれの軌道回転が相殺し

ていると解釈された。しかし、SI-DISでの破砕関数の影響や軌道回転の大きさの定量



的評価など、さらなる研究の展開が求められている。

一方、理論面では現象論的なモデルや格子QCD(例えば χ QCDグループ, KITOC-July 17, 2012、左図)による核子のスピン分解が進められ、クォークの軌道回転寄与の重要性が指摘されている。



2. 研究の目的

本研究では、**偏極ドレル・ヤン(DY)**

反応でのSivers関数の測定によってクォークの**軌道回転寄与を確定し、一般化パートン分布**の測定によって、軌道角運動量寄与を定量的に決定する。

3. 研究の方法

[1] **偏極DY反応でのSivers関数の測定**

クォークの直接観測に理想的である偏極DY反応($\pi^- + p^\uparrow \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$)でのSivers関数 $f_{1T, DY}^\perp$ を世界に先駆けて測定する。改造した偏極ターゲットを既存のセットアップに組み込み、160GeVの π^- を偏極陽子に入射し、DY過程のスピン方位角相関を調べる。偏極ターゲットを用いてクリーンなDY過程での測定は、COMPASSのみのユニークな手法であり、独創的である。場の理論によれば、 f_{1T}^\perp には反応依存性が現れ、Collins(PLB, 532(2002)43)による普遍的な議論から、SI-DIS反応とDY反応の関数は $f_{1T, SIDIS}^\perp = -f_{1T, DY}^\perp$ となる。この予言を検証し、TMD-PDFの理論的な枠組みの正当性を示し、**クォークの軌道回転効果の存在を決定**付ける。

[2] **GPD (Generalized Parton**

Distribution) の測定

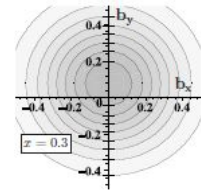
GPD は核子の形状因子 (核子のサイズを与える) とクォーク分布 (縦運動量比 x 分布) を統一的に拡張した重要な量として注目されている。摂動 QCD によると GPD はクォークの全角運動量、すなわちスピンと軌道角運動量の和を与える (J_i の和則 $X.J_i$, J.Phys. G24, (1998), 1181)。従って、GPD から既知のクォークスピン寄与を用いて**軌道角運動量寄与**を抽出できる。また、GPD のフーリエ変換は縦運動量比 (x) と横位置 (b_x, b_y) の相関を与える。つまり、クォークが持つ (縦方向) 運動量の大きさの関数として、横方向の位置の情報が得られ、**核子の 3D イメージ** (核子トモグラフィ) を構築できると期待される (PRD 66 (2002) 114005, Int.J.Mod.Phys.,A,18 (2003) (右図)。GPD は深部仮想コンプトン散乱 (DVCS) と関連し、実験では排他的な 1 光子生成を観測し、散乱平面と光子の方位角相関を調べる。本研究では、低エネルギー反跳陽子やガンマ線の検出に適した薄肉の CFRP と山形大で開発されたナノ銀インク技術を基に大型水素ターゲットを開発し、小さな x の領域で初めてのデータを収集し、GPD を抽出する。それらを既存のデータと組み合わせ、 J_i の和則からクォークの全角運動量寄与を求め、最終的に軌道角運動量の情報を引き出す。

4. 研究成果

(1) 偏極ドレルヤン測定

本測定は 190GeV の負電荷 π 中間子をビームに垂直方向にスピン偏極した陽子標的に入射し、ドレルヤン過程を経て生成されるミュオン対を検出し、様々なスピン非対称度を測定した。データ収集は 2015 年 5 月から 10 月まで、およそ 6 ヶ月に亘って行われた。実験セットアップは図 1 に示すように、偏極標的のすぐ下流にハドロニアブソーバ設置され、その下流にはミュオン対をとらえるため、従来の COMPASS スペクトロメータがある。偏極標的にもちいられたのは固体アンモニアでアンモニア

分子中の水素核が偏極している。最大偏極度はおよそ 80% 程度だった。スピン非対称度に関する系統誤差を低減するため、標的セル



は 2 つの部分に分割され、それぞれ逆方向にスピン偏極された。また、偏極方向は数日毎に変更された。図 2 は検出されたミュオン対の不変質量分布である。3 GeV/c² 付近のピークは J/psi の生成によるが、4.3 ~

u-quark の横位置分布の GPD モデル計算。陽子は x 軸方向に偏極。核子スピンの左右で非対称な分布となる。(Int.J.Mod.Phys. A18:173-208, 2003.)

8.5GeV/c² の領域はドレルヤン (DY) 過程が支配的であり、その領域のイベントを解析に用いた。解析では、陽子のスピンに対するミュオン対 (仮想光子) の相関や、仮想光子静止系に於ける 2 つのミュオンの放射方向などに関する相関などの非対称度が得られた (図 3)。図 3 の一番上に表示されている非対称度は核子内クォークの分布を表すシバース関数と関係づけられ、この非対称度はシバース非対称度と呼ばれている。ドレルヤン反応においてシバース非対称度が測定されたのは、これが最初である。ここで、これまでのレプトン入射での準包括的深部非弾性散乱 (SIDIS) では既にシバース非対称度が測定されており (HERMES や COMPASS) その値は 0 とは異なっている。これは、クォークの軌道角運動量 (OAM) 寄与を示唆している。また、摂動 QCD では SIDIS と DY で

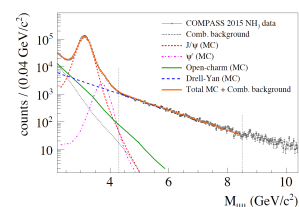


図 2: ミュオン対の不変質量分布

はシバース関数の符号が逆転することが予

言されており、この予言を確認することは摂動 QCD の枠組の確認であると共に OAM の存在の重要な証左ともなる。図 4 は今回得られた DY でのシバース非対称度を上記の予言と比べたものである。非対称度が正の領域のカーブは符号逆転の場合の予言、負の領域のカーブは符号が逆転しない場合の予言である。Q2 の依存性の取り方で複数の予言が存在する。データは符号逆転を考える場合に矛盾しない結果を与えている。この結果は研究成果（論文）[4] として出版されている。

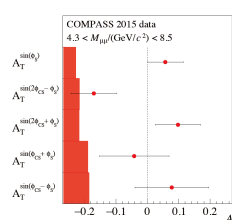


図 3 : 非対称度(すべての変数で積分後)

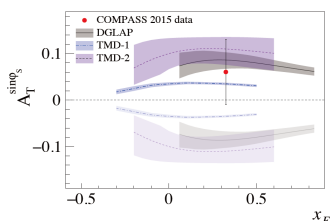


図 4 : シバース非対称度と摂動 QCD の予言 (横軸はクォーク対に対するファインマン x)

(2) 深部仮想コンプトン散乱に関する測定

本測定では 160GeV ミューオンを非偏極陽子に入射し、収状態に排他的な 1 光子事象をとらえ、深部仮想コンプトン散乱 (DVCS) の断面積や角分布に関する情報を得る。COMPASS では偏極した正負の電荷のミューオンが供給されるので、それぞれのビーム条件毎の断面積が得られ、これらを組み合わせることで、charge-spin 非対称度と呼ばれる量を決定できる。この非対称度は GPD の情報を与えることが知られている。本測定には従来の COMPASS

セットアップに反跳陽子検出の内部に 2.5m 長の大型液体水素標的を組みこんで行われた(図 5 参照)。水素標的には山形大学で開発された CFRP にナノ銀をコートし、断熱性能を高めた真空容器が初めて利用された(研究成果(論文)[14])

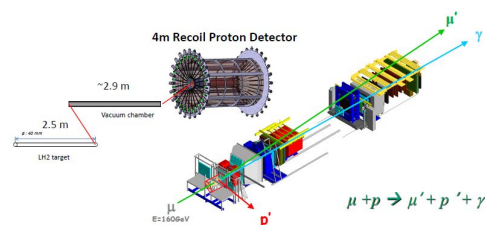


図 5 : DVCS 測定のセットアップ

この測定は 2012 年から予備的に行われ、本格的なデータ収集は 2016-2017 年にそれぞれ 6 ヶ月づつ行われた。現在データの解析が行われてる。これまでに、2012 年に採取したデータの解析が終了しており、DVCS の微分断面積についてプレリミナリーな結果が得られている。図 6 は DVCS 微分断面積の t 依存性である。微分断面積は t に依存して指数関数的に落ち、その係数をスローパラメータと呼ぶ。この値は次のように陽子中のクォークの横方向分布の広がりに関係づけられる。

$$\langle r_{\perp}^2(x_{Bj}) \rangle = 2 \langle B(x_{Bj}) \rangle \hbar^2,$$

この値は、図 7 に示すように HERA で小さなブジョルケン x 領域に測定されているが、今回比較的大きな x = 0.056 において初めて得られた(平均二乗半径は 0.58fm と与えられた)

この結果と HERA の結果を比べると大きな x 領域ではクォーク分布の横方向半径が若干小さくなっている傾向を示していることが分かる。

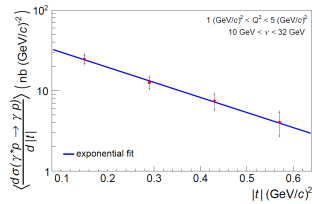


図 6 : DVCS 微分断面積

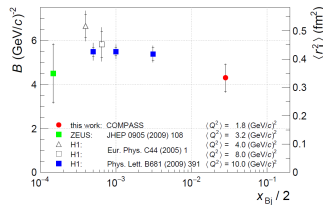


図 7 : DVCS 断面積のスロープパラメータ B と陽子の横断面積の x 依存性。
赤い点が COMPASS のデータ。

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 14 件)

1	Transverse-momentum-dependent multiplicities of charged hadrons in muon-deuteron deep inelastic scattering M. Aghasyan, <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>H. Matsuda</u> , <u>T. Mastuda</u> ,... <u>G. Nukazuka</u> , <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (226 authors) Phys. Rev. D 97 (2018) 032006 , https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.032006
2	Exclusive ω meson muoproduction on transversely polarised protons COMPASS, C. Adolph, <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>H. Matsuda</u> , <u>T. Mastuda</u> ,... <u>G. Nukazuka</u> , <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (228 authors) Nucl. Phys. B 915 (2017) 54-475 , https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2016.12.015
3	First measurement of the Sivers asymmetry for gluons from SIDIS data COMPASS, C. Adolph,..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (228 authors) Phys.Lett. B 772 (2017) 854-864 , https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.07.018
4	First measurement of transverse-spin-dependent azimuthal asymmetries in the Drell-Yan process. COMPASS M. Aghasyan, ..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (219

	authors), Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 112002 , https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.112002
5	Sivers asymmetry extracted in SIDIS at the hard scale of the Drell-Yan process at COMPASS COMPASS, C. Adolph,..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (227 authors) Phys.Lett. B 770 (2017) 138-145 , https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.04.042
6	Final COMPASS results on the deuteron spin-dependent structure function g_{1d} and the Bjorken sum rule COMPASS, C. Adolph,..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (225 authors) Phys.Lett. B 769 (2017) 34-41 , https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.03.018
7	Multiplicities of charged pions and unidentified charged hadrons from deep-inelastic scattering of muons off an isoscalar target COMPASS, C. Adolph,..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (228 authors) Phys.Lett. B 769 (2017) 1-10 , https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.09.042
8	Leading-order determination of the gluon polarisation from semi-inclusive deep inelastic scattering data COMPASS, C. Adolph,..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (221 authors) Eur.Phys.J. C 77 (2017) 209-221 , DOI 10.1140/epjc/s10052-017-4716-x
9	The spin structure function g_{1p} of the proton and a test of the Bjorken sum rule. COMPASS, C. Adolph,..., <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (208 authors), Phys.Lett. B 753 (2016) 18-28 , https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.11.064
10	Interplay among transversity induced asymmetries in hadron leptonproduction. By COMPASS, C. Adolph,... <u>N. Doshita</u> ,... <u>S. Ishimoto</u> ,... <u>T. Iwata</u> ,... <u>K. Kondo</u> ,... <u>T. Mastuda</u> ,... <u>Y. Miyachi</u> ,...et al., (209 authors), Phys.Lett. B 753 (2016) 406-411 , https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.12.042

11	<p>Longitudinal double spin asymmetries in single hadron quasi-real photoproduction at high pT. COMPASS, C.Adolph,..., N. Doshita, ..., S. Ishimoto, ..., T. Iwata, ..., K.Kondo, ..., T.Mastuda, ..., Y.Miyachi, ..., et al., (210 authors), Phys.Lett. B753 (2016) 573-579, https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.12.035</p>
12	<p>Collins and Sivers asymmetries in muonproduction of pions and kaons off transversely polarised proton., COMPASS, C.Adolph,..., N. Doshita, ..., S. Ishimoto, ..., T. Iwata, ..., K.Kondo, ..., T.Mastuda, ..., Y.Miyachi, ..., et al., (209 authors), Phys.Lett. B744 (2015) 250-259, https://doi.org/10.1016/j.physletb.2015.03.056</p>
13	<p>A high statistics measurement of transverse spin effects in dihadron production from muon-proton semi-inclusive deep-inelastic scattering. COMPASS, C.Adolph,..., N. Doshita, ..., S. Ishimoto, ..., T. Iwata, ..., K. Kondo, ..., T.Mastuda, ..., Y.Miyachi, ..., et al., (221 authors), Phys.Lett. B736 (2014) 124-131, https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.06.080</p>
14	<p>A 2.5 m long liquid hydrogen target for COMPASS. E. Bielert,..., N. Doshita, ..., S. Ishimoto, ..., T.Iwata, ..., K. Kondo, ..., T.Mastuda, ..., Y.Miyachi, ..., et al., (18 authors), Nucl.Instrum.Meth. A746 (2014) 20-25, https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.01.067</p>

[学会発表](計5件)

1	<p>日本物理学会、東京理科大学、口頭発表、審査あり(招待講演) 2018/3/23 実験核物理領域、素粒子論領域、素粒子実験領域、理論核物理領域 多様な方法によって解き明かす陽子のパズル 宮地義之、「偏極標の実験による陽子スピンパズルの解明」</p>
2	<p>日本物理学会、東京理科大学、口頭発表、審査無し、2018/3/22 岩田高広、近藤薫、堂下典弘、糠塚元気、松田洋樹、宮地義之、石元茂、澤田崇広、鈴木肇、堀川直顕、松田達郎、他 COMPASS 共同研究グループ、「CERN-COMPASS の将来の将来計画について - 陽子標的偏極 Drell-Yan 測定と重陽子標的 Transversity 測定 - 」</p>
3	<p>日本物理学会、宇都宮大学、口頭発表、審査無し、2017/9/15、糠塚元気、岩田高広、近藤薫、堂下典弘、松田洋樹、</p>

	<p>宮地義之、石元茂、澤田崇広、鈴木肇、堀川直顕、松田達郎、他 COMPASS 共同研究グループ「COMPASS における偏極ドレル・ヤン実験の現状報告 V」</p>
4	<p>日本物理学会、宇都宮大学、口頭発表、審査あり(招待講演) 2017/9/14 実験核物理領域、理論核物理領域合同シンポジウム 主題:日本の核物理の将来、宮地義之、「核子構造の物理の将来」</p>
5	<p>9th Workshop on Hadron physics in China and Opportunities Worldwide、南京大学、口頭発表、審査あり(招待講演) 2017/07/25、T.Iwata, on behalf of COMPASS,「TMD experiments from COMPASS SIDIS」</p>

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩田高広 (IWATA TAKAHIRO)

山形大学・理学部・教授

研究者番号: 70211761

(2)研究分担者

松田達郎 (MATSUDA TATSURO)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 20253817

宮地義之 (MIYACHI YOSHIYUKI)

山形大学・理学部・准教授

研究者番号: 50334511

(3)連携研究者

堂下典弘 (DOSHITA NORIHIRO)

山形大学・理学部・助教

研究者番号: 90451658

近藤 薫 (KONDO KAORI)

山形大学・理学部・助教

研究者番号: 80451657

橋本 亮 (HASHIMOTO RYOU)

山形大学・理学部・プロジェクト研究員

研究者番号: 50644952

堀川直顕 (HORIKAWA NAOAKI)

中部大学・工学部・教育支援員

研究者番号: 70022697

鈴木 肇 (SUZUKI HAJIME)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 20260044

石元 茂 (SHIGERU ISHIMOTO)

KEK・素粒子原子核研究所・技術支援員

研究者番号: 50141974