

平成 22 年 4 月 25 日現在

研究種目：特別推進研究

研究期間：2006～2009

課題番号：18002006

研究課題名(和文) 大型偏極ターゲットを用いたハドロンのクォーク・グルーオン構造の研究

研究課題名(英文) Study of quark-gluon structure of hadrons with a large polarized target

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

研究成果の概要(和文)：核子スピンの起源の探究の中で、グルーオンスピン寄与に関する情報を得るために、グルーオン偏極度の測定を2つのチャンネルで行った。どちらのチャンネルでも、これまででの最高精度でグルーオン偏極度を与ることができた。その結果、グルーオンスピンの核子スピンへの寄与は、これまでの理論的な予測に反して大きくは無いことが見いだされた。また、クォークのスピンの状態を示す Transversity に関する Collins 非対称度やクォークの軌道回転寄与に関わる Sivers 非対称度を実験的に明らかにし、核子のクォーク構造の詳細を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have measured the gluon polarization in two reaction channels in order to investigate the origin of the nucleon spin. We obtained the polarization with the best precision ever in both channels. Contribution of the gluon spin to the nucleon spin is found to be not as large as the expectations by theories. We have obtained Collins and Sivers asymmetries which are related to the transverse spin state of quarks and their orbital motion. The results provided with rich information on details of quarks inside the nucleon.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	44,200,000	13,260,000	57,460,000
2007年度	57,000,000	17,100,000	74,100,000
2008年度	25,400,000	7,620,000	33,020,000
2009年度	17,300,000	5,190,000	22,490,000
年度			
総計	143,900,000	43,170,000	187,070,000

研究分野：数物系科学

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：核子、スピン、クォーク、グルーオン、ハドロン、QCD

1. 研究開始当初の背景

核子は「スピン」自由度を持つが、そのスピンが何によってもたらされるのかが、分かっていない。核子などのハドロンは、「クォーク」が結びついて出来ている。クォークもスピンを持っており、核子のスピンはクォークスピンが原因と考えられてきた。ところが、クォークのスピン寄与が小さいことが明らかになり、核子のスピンが何によるのかが、問題となっていた。

2. 研究の目的

核子内にはクォーク以外にスピンを持つ「グルーオン」も存在する。本研究では、核子のスピンの起源を探求するが、特にグルーオンスピン偏極度の直接測定を行い、核子スピンに対するその寄与を調べる。

3. 研究の方法

核子スピンをそろえた「大型偏極標的」に、偏極ミュオンビームを入射し、グルーオンが関与する反応のスピン依存性を調べる。これは、CERN(欧州原子核研究所)において国際共同研究組織 COMPASS として行う。日本グループは、大型偏極標的の技術を持つ世界でも数少ないグループとして、本実験を支える。

4. 研究成果

(1)クォークのヘリシティ構造

散乱ミュオンと仮想光子にたたかれて生成されたハドロンを同時計測する Semi-Inclusive-DIS (SIDIS) のスピン非対称度を調べることで、クォークのヘリシティ分布をフレーバー分離して調べることができる。COMPASS では重陽子、陽子に対して π^+, π^-, K^+, K^- 生成の SIDIS の非対称度、 $A_1^h(h = \pi^+, \pi^-, K^+, K^-)$ を測定した。これらの非対称度は、リーディングオーダーでは、クォークのヘリシティ分布

$\Delta q(x, Q^2) = q^+(x, Q^2) - q^-(x, Q^2)$ 、破砕関数 $D_q^h(z, Q^2)$ を用いて表すことができる。こ

こで、 $q = u, d, \bar{u}, \bar{d}, s, \bar{s}$ を考える。他の実験から求められた破砕関数を用い、既知の非偏極クォーク分布関数を用いると、非対称度データからそれぞれのヘリシティ分布を得ることができる。この結果、シークォークの

ヘリシティ分布はほぼ 0 であることが示された。これは、 g_1 に対するグローバルフィットから求められた値とよく一致しているが、グローバルフィットが負の値を与える strange-sea 分布だけは、食い違いを示しており、今後の課題となる。

(2)グルーオン偏極

COMPASS ではグルーオンの偏極度の測定に努力を傾注してきた。グルーオン偏極度は、仮想光子とグルーオンが融合し、クォーク対を作るプロセス (PGF=Photon-Gluon-Fusion) に対するスピン非対称度から決定される。PGF の素過程の Analyzing Power は、摂動論的 QCD (pQCD) により計算できるので、スピン非対称度を実験で求めることで、グルーオン偏極度を抽出することができる。COMPASS では PGF の同定に 2 つの方法を用いる。1 つは、オープンチャームと呼ばれる方法で、 D^0 などのチャーム中間子を捕らえる。これは PGF によりチャームペアが生成され、チャーム中間子と反チャーム中間子にフラグメントする場合に相当する。摂動論的 QCD の計算で要求されるハードスケールはチャームクォークの質量によって保証される。オープンチャーム生成は、PGF が支配的だと知られているので、物理的なバックグラウンドの少ないクリーンなチャンネルである。しかし、チャームの生成確率は低いため、統計的には不利なチャンネルでもある。もう一つの方法は、high-Pt ハドロンと呼ばれるもので、大きな Pt を持つ異なる電荷のハドロンが逆方向に生成されたイベントを選択する。ハードスケールは、大きな Pt によって保証される。この場合、統計的には有利だが、Inclusive-DIS や QCD-COMPTON の物理的な背景事象が避けられないため、それらの非対称度を考慮して解析を行わなければならない。

現在までに、2002 年から 2004 年のデータに対しての high-Pt チャンネルの解析と、2002 年から 2006 年までのオープンチャームチャンネルの解析が行われている。High-Pt チャンネルでは、ハードスケール $\langle \mu^2 \rangle = 3 \text{ GeV}^2$ で、 $x_g = 0.1$ 付近において、 $Q^2 > 1 \text{ GeV}$ のデータではグルーオン偏極度は $\Delta G / G = 0.08 \pm 0.10 \pm 0.05$ 、 $Q^2 < 1 \text{ GeV}$ に対して $\Delta G / G = 0.016 \pm 0.058 \pm 0.055$ とい

う結果が得られている。どちらも誤差を考慮すると、0と矛盾しない値である。少なくとも $x_g = 0.1$ においてグルーオン偏極度は非常に小さいという結論になる。

また、オープンチャームチャンネルでは、D0 および D^* イベントの解析によって、 $x_g = 0.1$ 付近で、 $\Delta G / G = -0.39 \pm 0.24(stat.)$ という結果が得られている。このときのハードスケールは、 $\langle \mu^2 \rangle = 13 GeV^2$ という大きな値である。オープンチャームの場合は精度が良いとは言えないが、こちらのグルーオン偏極度も誤差の範囲で0と矛盾しない。

さらに私たちは、グルーオンスピン寄与を推定するために、DIS データに対して QCD 解析を試みた。COMPASS では、グルーオン偏極度測定の精度を上げるため、長期間のデータ収集を続けてきた。結果として、 x の小さな領域の DIS のデータは、SMC 実験の実に5倍以上の統計量で蓄積された。そして、このデータを含めたワールドデータに対して QCD の DGLAP 方程式を利用したグローバル解析を行ったところ、グルーオンヘリシティ分布は2つの可能性に絞られた。この分布を x_g の全領域で積分したグルーオンスピン寄与の 1st-moment は、アノマリーの議論から予想されたほど大きい値ではなく、

$\Delta G = \int_0^1 dx \Delta G(x) = -0.3$ から $+0.3$ と、かなり小さいと推定される。これは、RHIC-SPIN のデータとも矛盾しない。

ここで、核子スピンに関するヘリシティ和則、 $\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \Delta G + \langle L_z \rangle$ を思い出すと、 $1 = \Delta \Sigma + 2\Delta G + 2\langle L_z \rangle$ となり、クォークスピン寄与については $\Delta \Sigma \approx 0.3$ と確定しているので、 $0.35 \approx \Delta G + \langle L_z \rangle$ となる。仮に、 $\Delta G = +0.3$ だとすると、 $\langle L_z \rangle = 0.05$ であり、 $\Delta G = -0.3$ ならば、 $\langle L_z \rangle = 0.75$ となる。前者の場合はクォークスピン以外の寄与のほとんどがグルーオンスピンからであり、核子スピンに対するグルーオンスピン寄与は、圧倒的になる。ところが、後者の場合グルーオンスピンよりも軌道回転寄与が逆方向に大きく、結果として核子スピンに対しては軌道回転寄与が支配的となる。結局、グルーオンスピン寄与に対する包囲網は、かなり狭められてきたが、核子のスピン構造に関しておぼろげなイメージを与えるまでには至って

いない。今後、さらなる精度向上の努力が必要である。

(3)Sivers 非対称度

クォークの軌道回転も核子スピンを発現させるメカニズムの1つとして重要視されてきている。COMPASS では横偏極した核子標的からの中間子生成における Sivers 非対称度からクォークの軌道回転寄与にアプローチしてきた。この非対称度は、核子スピンの方向とクォークの横方向運動量の相関を示し、軌道回転の有無の指標となる。いわゆる、横方向依存分布関数 (TMD-PDF=Transverse Momentum Dependent Parton Distribution Function) の一つである。COMPASS では、Sivers 非対称度測定を重陽子標的、陽子標的に対して行ってきた。

重陽子に対する Sivers 非対称度は、測定誤差を考慮すると0となるが、これは u-quark と d-quark の Sivers 非対称度が逆符号で相殺している解釈も成り立つ。一方、HERMES 実験において陽子に対して0でない Sivers 対称度が観測されているが、COMPASS の測定では、陽子に対しても0と矛盾しない結果となった。ただし、HERMES と COMPASS のカバーする運動学的領域は大きく違うこと、COMPASS の統計精度が十分でないことに注意する必要がある。結局、Sivers 非対称度の有無についてコンセンサスが確定できていないのが、現状である。

(5)transversity

COMPASS ではクォークの Transversity の研究も精力的に行ってきた。従来の実験は、ビーム方向に偏極した核子中で、やはりビーム方向に偏極したクォークの確率分布を調べるものであり、ヘリシティ分布の測定が主であった。Transversity は、ビームに対して垂直方向に偏極 (横偏極) した核子中での横偏極したクォークの確率分布と解釈される。この量は、COMPASS 実験や HERMES 実験において初めて研究されるようになった Transversity は、摂動論的 QCD の最低次近似 (ツイスト2) においてクォークを記述する際、非偏極クォーク分布、ヘリシティ分布と同様に重要な量である。COMPASS では横偏極標的からの中間子生成における方位角分布を調べ、Transversity に関連する Collins 非対称度を求める。Collins 非対称度は、Transversity と Collins 破砕関数の積として与えられるが、未知であったため、Transversity を抽出することができなかった。ところが、Belle 実験において Collins 破砕関数が調べられたこと

で、Transversity 抽出が可能となった。実際に、HERMESの陽子に対する Collins 非対称度、COMPASS の重陽子に対する Collins 非対称度を総合的解析が Anselmino らによって行われ u-quark, d-quark それぞれに対する Transversity が初めて明らかになった。

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 11 件)

- [1] Gluon Polarisation in the Nucleon and Longitudinal Spin Asymmetries from Open Charm Muoproduction
Phys.Lett.B676:31-38,2009.
査読有り
By COMPASS Collaboration (225 authors listed), M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.
- [2] Measurement of the Longitudinal Spin Transfer to Lambda and Anti-Lambda Hyperons in Polarised Muon DIS.
Eur.Phys.J.C64:171-179,2009.
査読有り
By COMPASS Collaboration(224 authors listed), M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and other COMPASS Collaboration members.
- [3] Flavour Separation of Helicity Distributions from Deep Inelastic Muon-Deuteron Scattering.
Phys.Lett.B680:217-224,2009.
査読有り
By COMPASS Collaboration(224 authors listed), M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, T.Michigami and COMPASS Collaboration members.
- [4] Collins and Sivers asymmetries for pions and kaons in muon-deuteron DIS.
Phys.Lett.B673:127-135,2009,
査読有り
By COMPASS Collaboration(224 authors listed), M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda and other COMPASS Collaboration members.
- [5] The Polarised Valence Quark Distribution from semi-inclusive DIS.
Phys.Lett.B660:458-465,2008.
査読有り、By COMPASS Collaboration(238 authors listed), M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda and other COMPASS Collaboration members.
- [6] Double spin asymmetry in exclusive ρ^0 muoproduction at COMPASS
Eur.Phys.J.C255-265.2007, 査読有り
By COMPASS Collaboration(237 authors listed), M.Alekseev, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi and other COMPASS Collaboration members
- [7] Spin asymmetry A1(d) and the spin-dependent structure function g1(d) of the deuteron at low values of x and Q^{*2} .
Phys.Lett.B647:330-340,2007. 査読有り
By COMPASS Collaboration(231 authors listed), V.Yu.Alexakhin, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi and other COMPASS Collaboration members
- [8] The COMPASS experiment at CERN
Nucl.Instrum.Meth.A577:455-518,2007,
査読有り
By COMPASS Collaboration(318 authors listed), P.Abbon, N.Doshita, T.Hasegawa, N.Horikawa, S.Horikawa, S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo, T.Matsuda, N.Takabayashi, T.Toeda and other COMPASS Collaboration members
- [9] A New measurement of the Collins and Sivers asymmetries on a transversely polarised deuteron target.
Nucl.Phys.B765:31-70,2007. 査読有り
By COMPASS Collaboration(240 authors listed), E.S.Ageev,

- N.Doshita, T.Hasegawa,
N.Horikawa, S.Horikawa,
S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo,
T.Matsuda, T.Toeda and other
COMPASS Collaboration members
- [10] The Deuteron Spin-dependent
Structure Function $g_1(d)$ and its First
Moment.
Phys.Lett.B647:8-17,2007. 査読有り
By COMPASS Collaboration(230
authors listed), V.Yu.Alexakhin,
N.Doshita, T.Hasegawa,
N.Horikawa, S.Horikawa, T.Iwata,
K.Kondo, T.Matsuda and other
COMPASS Collaboration members
- [11] Gluon polarization in the nucleon from
quasi-real photoproduction of
high-p(T) hadron pairs.
Phys.Lett.B633:25-32,2006, 査読有り
By COMPASS Collaboration(205
authors listed), E.S.Ageev,
N.Doshita, T.Hasegawa,
N.Horikawa, S.Horikawa,
S.Ishimoto, T.Iwata, K.Kondo,
T.Matsuda, N.Takabayashi,
T.Toeda and other COMPASS
Collaboration members.
- [学会発表](計 31件)
- [1] Takahiro Iwata: “*Hadron
spectroscopy at COMPASS –
exotic states at COMPASS*”
(invited)
New Frontiers in QCD - Kyoto,
Japan, January 18 - March 19,
2010
- [2] Norihiro Doshita: “*Future
Drell-Yan program of the
COMPASS collaboration*”
KEK 理論センター研究会
「High-energy hadron physics
with hadron beams」
2010年1月6日 1月8日、KEK,
つくば市
- [3] Takahiro Iwata:
“*Measurements of the Gluon
Polarization in the Nucleon at
COMPASS*”
The 3rd Joint Meeting of the
Nuclear Physics Division of the
APS and JPS
Oct.13 - 17, 2009, Hilton Waikoloa
Village, Hawaii
- [4] Tatsuro Matsuda:
“*Quark helicity distributions from
DIS and SIDIS at COMPASS*”
The 3rd Joint Meeting of the
Nuclear Physics Division of the
APS and JPS
Oct.13 - 17, 2009, Hilton Waikoloa
Village, Hawaii
- [5] Norihiro Doshita:
“*Tranaversty results and
polarized Drell-Yan
measurement at COMPASS*”
The 3rd Joint Meeting of the
Nuclear Physics Division of the
APS and JPS
Oct.13 - 17, 2009, Hilton Waikoloa
Village, Hawaii
- [6] Norihiro Doshita: “*Polarized
Drell-Yan measurement at
COMPASS*”
第7回環太平洋高エネルギースピ
ン物理学国際会議
2009年9月15日 - 9月18日、遊
学館、山形市
- [7] Norihiro Doshita: “*Polarized
Target for COMPASS Drell-Yan
program*”
国際シンポジウム「偏極標的とその
応用」2008年2月29日 - 3月1日,
月岡ホテル, 上山市
- [8] Takahiro Iwata: “*COMPASS
Drell-Yan Program*”
59th RIBF Nuclear Physics
Seminar 2008年4月8日、理化
学研究所、和光市
- [9] Norihiro Doshita: “*Past and future
of the COMPASS polarized
target*” Symmetries and Spin
(Spin-Praha-2008)
July. 20 - 26, 2008, Charles
University, Prague
- [10] Takahiro Iwata., “*Results for
Transverse Spin Physics at
COMPASS*”
The 6th Circum-Pan-Pacific
Symposium on High Energy Spin
Physics, July. 30 - Aug. 2, 2007,
University of British Columbia,
Canada
- [11] Norihiro Doshita., “*Measurement
of the Gluon Polarization at
COMPASS*”
The 6th Circum-Pan-Pacific
Symposium on High Energy Spin
Physics, July. 30 - Aug. 2, 2007,
University of British Columbia,
Canada
- [12] Norihiro Doshita: “*COMPASS*”

Target
International Workshop on
Polarized Sources, Target &
Polarimetry
Sep. 10 - 14, 2007, Brookhaven
National Laboratory, New York

- [13] Takahiro Iwata, " *Upgrade of the polarized target and the spectrometer of COMPASS* "
Joint Meeting of The PAC
Region Particle Physics
Communities
Oct.30 - Nov.3, 2006, Sheraton
Waikiki Hotel, Hawaii
- [14] Kaori Kondo, " *Measurement of Delta G/G to study gluon spin contribution* "
Joint Meeting of The PAC
Region Particle Physics
Communities
Oct.30 - Nov.3, 2006, Sheraton
Waikiki Hotel, Hawaii
- [15] Norihiro Doshita, " *Heat input into the target material* "
3rd Meeting Polarized Nucleon
Targets for Europe, in the 6th
European Framework Program, 2-4
February 2006, Rech, Germany

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

吉田 浩司 (YOSHIDA HIROSHI)
山形大学・基盤教育院・准教授
研究者番号 : 80241727
(H18 H20 : 連携研究者)

松田 達郎 (MATSUDA TATSURO)
宮崎大学、工学部、教授
研究者番号 : 20253817
(H18 H20 : 連携研究者)

堀川 直顕 (HORIKAWA NAOAKI)
中部大学・工学部・教授
研究者番号 : 70022697
(H18 H18 : 連携研究者)

鈴木 肇 (SUZUKI HAJIME)
中部大学・工学部・准教授

研究者番号 : 20260044
(H18 H20 : 連携研究者)

(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

石元 茂 (ISHIMOTO SHIGERU)
K E K・素粒子原子核研究所・講師
研究者番号 : 50141974

長谷川 武夫 (HASEGAWA TAKEO)
宮崎大学・工学部・名誉教授
研究者番号 : 70025386