

大型偏極標的を用いた核子のスピン構造の研究

Study on the Nucleon Spin Structure by the Large Polarized Target

(日本物理学会推薦)

研究代表者	山形大学	岩田高広	Yamagata University	Takahiro Iwata
協同研究者	宮崎大学	松田達郎	Miyazaki University	Tatsuro Matsuda
	中部大学	堀川直顕	Chubu University	Naoaki Horikawa

It has been believed for a long time that the origin of the nucleon spin is the quark spin. However, recent experiments have made it clear that the contribution of the quark spin is less important. The question about the origin of the nucleon spin still remains. According to QCD theory which is believed to describe correctly interactions of quarks, the gluon spin may play an important role to construct the nucleon spin.

We have been studying the contribution of the gluon spin in the international collaboration named COMPASS at CERN using a large polarized target.

We have measured the gluon polarization with the best accuracy ever obtained leading to the conclusion that the gluon spin contribution is not so large as expected by several models. In other words, the nucleon spin may not be explained only with the spins of quarks and gluons, implying that the orbital motion of quarks and gluons plays an important role.

Other our results give an interesting speculation: observed zero-Sivers-asymmetry for the single hadron production on the transversely polarized deuteron leads to that the orbital motion of gluons does not contribute to the nucleon spin, in other words, only that of quarks does .

研究目的

すべての物質は原子によって構成されている。原子は電子と原子核に分けることができる。電子はそれ自身が基本粒子だが、原子核は陽子と中性子（これらを総称して核子と呼ぶ）から成り立っている。さらに、陽子や中性子は、自転にあたる「スピン」という内部自由度を持っているため、小さな磁石になっていることが分かっている。医療用のMRI（磁気共鳴断層撮影）では陽子が小さな磁石になっているこ

とを利用して体内の様子を撮影しているなど、日常生活で「スピン」は役に立っている。ところが、このスピンの何によってもたらされているのかが、まだはっきりしていない。

陽子や中性子などのハドロンは、「クォーク」が結びついて出来上がっている。このクォークもスピンを持っているので、これまでは核子のスピンはクォークのスピンが原因と考えられてきた。ところが、最近の実験でクォークのスピン寄与が小さいことが明らかになった。では、核子のスピンは何によっているのか？

クォーク間の力を正しく記述すると信じられている QCD 理論によると、クォークを核子の内部に閉じ込める役割を担う「グルーオン」という粒子が存在する。このグルーオンもやはりスピンを持っており、核子のスピンの貢献をすることができる。本研究では、特に核子のスピンに対するグルーオンのスピンの役割を調べる。核子のスピンをそろえた「偏極ターゲット」に、ビーム（このビーム粒子のスピンも揃えてある）を入射して、スピンの方向によって反応の起こりやすさの違いを調べる実験を行い、核子のスピンの起源をさぐる。

具体的に、ヨーロッパ原子核研究機構（CERN）の COMPASS 共同実験において、大型偏極標的を用いて、偏極深部非弾性散乱実験を行うことにより、以下の課題を遂行する。

- (1) グルーオンのスピン偏極を直接測定し、グルーオンのスピン寄与を明らかにする。
- (2) クォークに対する横スピン構造関数および横方向スピン非対称度と呼ばれる物理量を抽出し、核子スピン構造の詳細を明らかにする。これにより、核子内部でのクォークスピンの状況を完全に決定する。

経過

2005年度

2005年度は CERN の加速器が停止していたので、COMPASS も物理データ収集を中断し、昨年までに得られたデータの解析と、2006年度に向けての実験準備に集中した。特に2006年には、日本グループのイニシアチブで建設された偏極ターゲット用大口径超伝導電磁石の設置が予定されていた。このためのマイクロ波キャビティの準備や、電磁石の制御系のチューニングをおこなった。また、2006年度にはこれまでの ${}^6\text{LiD}$ に替えて NH_3 を用いたデータ収集が予定されており、そのための準備作業をおこなった。

2006年度

この年度のデータ収集では、偏極ターゲット用大口径超伝導電磁石を設置したことで、大きな角度に放出されるハドロンに対する検出効率が向上したため、格段にデータ量を増やすことができた。特に、グルーオン偏極度を調べるために利用するオープンイベントの収量を増やすことができた。ところが、途中で加速器が故障した

ことにより、例年の半分程度のデータ収集時間を確保するにとどまった。しかしながら、前述の電磁石によりデータ収集効率が向上したため、これまでで最高の統計量が得られた。また、粒子識別のための RICH 検出器に光電子増倍管を組み込むという大掛かりな改良により、大幅にバックグラウンドを抑制できるようになった。予算面では、幸いにも科学研究費補助金特別推進研究に採択され、今後の4年間にわたる研究費が確保された。

考察

得られている結果

これまでに、グルーオン spin 寄与、横方向 spin 非対称度に関して重要な結果が得られている。

(1) グルーオン spin 寄与

われわれは、グルーオン spin 寄与を調べるため、偏極構造関数 g_1 に対する QCD 解析、オープンチャームイベントの非対称度、高い横方向運動量を持つ2つのハドロンイベントに対する非対称度など、さまざまな方法でグルーオン偏極度の導出を試みてきた。

それらをまとめたものが Fig. 1 のグラフである。

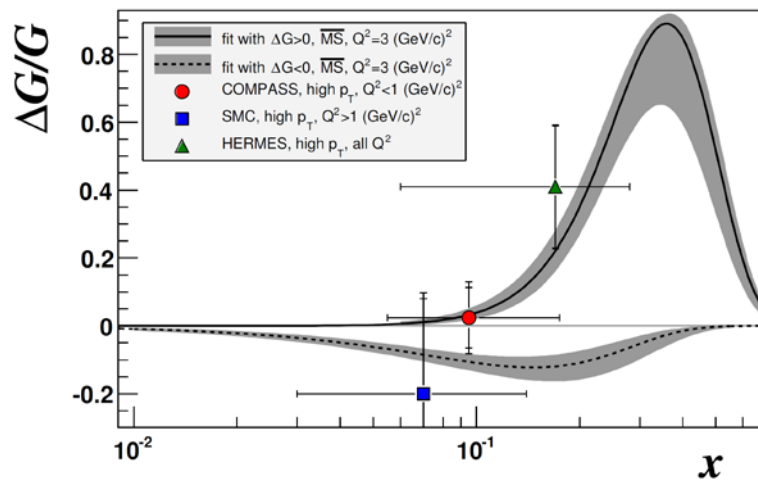


Fig.1 Gluon polarization as a function of Bjorken x of gluon.

このグラフはグルーオンの偏極度（縦軸）をグルーオンに対する Bjorken の x の関数として与えたものである。2つの帯状の曲線は、これまでの深部非弾性散乱実験データにより得られた構造関数 g_1 に対して QCD 解析をわれわれがおこなった結果を示している。この解析には、他のグループのデータも用いられているが、COMPASS の高精度データがグルーオン偏極度の決定に重要な役割を果たしている。また、 $x=0.1$ 付近の最も誤差が小さい点がわれわれの実験で得られたグルーオン偏極に対する直接測定データである。これは、大きな横向き運動量を持つ2つのハドロンが生成される際の spin 非対称度から得られたものであり、グルーオン偏極に関する世界で最も精度の高い測定データとなっている。これらを総合する

と、以下のような知見が得られたことになる。

われわれの QCD 解析では、グルーオン偏極の寄与に関して、2つの解に絞り込まれる。すなわち、グルーオンスピン寄与が正の解と負の解である。正の解の場合は、グルーオンスピン寄与が核子スピンに対して、約60%という大きくなり、負の解では、逆に-60%程度となる。直接測定データのデータは、正の解に良い一致を示しているが、負の解を排除するまでには至っていない。いずれにしても、グルーオンのスピン寄与は一部のモデルで予想されたような非常に大きな値ではないことがわかってきた。今後は、さらに直接測定データの精度を向上させることにより、グルーオンスピン寄与を確定することが課題となる。また、クォークやグルーオンの軌道運動の効果も重要な寄与を与える可能性に関する研究が発展してゆくとされる。

(2) 横方向スピン非対称度

COMPASS では、グルーオン偏極に関するデータ収集の残りの20%程度の実験時間をターゲットスピンをビームに垂直にして向け、横方向スピン非対称度のデータを収集している。これまでに偏極重陽子をターゲットにしたコリンズ非対称度やシバース非対称度などの横方向スピン非対称度の最高精度のデータが得られている。これらの非対称度は重陽子についてゼロになるというのが、われわれが得た結論であるが、中でも、単一ハドロン生成に関するシバース非対称度に関して、注目に値するデータが得られた。それは、この非対称度の重陽子に対する値がほとんどゼロになるというものである (Fig. 2)。シバース非対称度の原因は、オブジェクトの軌道回転によると考えられており、これまでのヘルメスグループによる陽子に対するシバース非対称度がゼロで無い有限値であるという実験事実を考慮して理論解析をおこなうと、グルーオンの軌道回転が核子のスピンに寄与していないという結論が得られる。したがって、今後はクォークの軌道回転効果が研究の焦点となってくる。

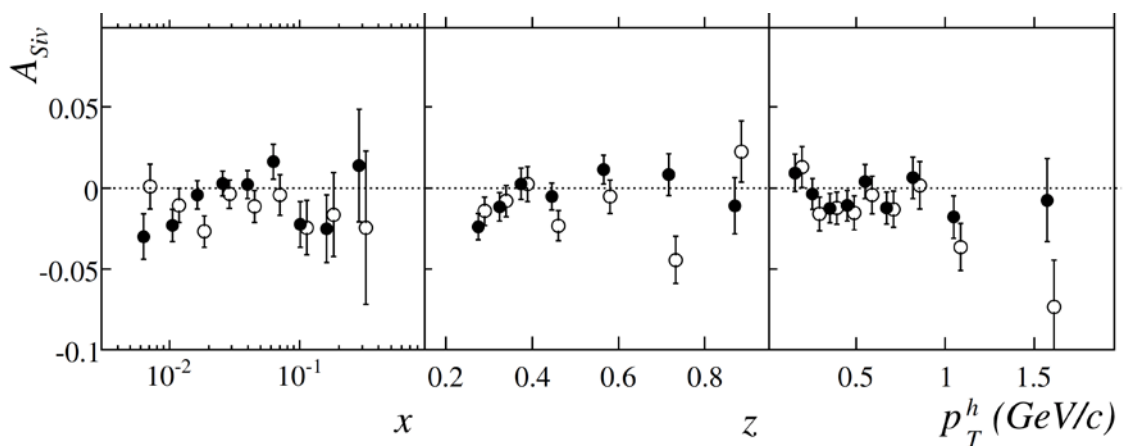


Fig. 2 Siverson Asymmetries for the deuteron obtained by COMPASS as a function of Bjorken x , the hadron energy fraction to the virtual photon, and the transverse momentum of the produced hadrons. The closed circles denote positive leading hadrons and the open circles negative leading hadrons.

研究発表

口頭発表

1. 岩田高広 ; 「Study of nucleon spin structure with a transversely polarized target in COMPASS.」、第 2 回日米物理学会合同核物理分科、2005/9/18-22、米国、ハワイ、マウイ島
2. 岩田高広 ; 「Recent Results from COMPASS.」、第 2 回日米物理学会合同核物理分科、2005/9/18-22、米国、ハワイ、マウイ島
3. 堀川直顕 ; 「CERN-COMPASS での核子スピン構造の研究—high-Pt ハドロン事象での核子内グルーオン偏極度の導出—」日本物理学会第 60 回年次大会、2005/3/24-27、東京理科大学野田
4. 岩田高広 ; 「Possibility of direct extraction of the transversity from polarized Drell-Yan measurement in COMPASS.」 Workshop on Hadron Structure at J-PARC, November 30 - December 2, 2005, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan,
5. 松田達郎 ; 「COMPASS による核子スピン構造の研究—核子内グルーオンスピン偏極の研究—」、日本物理学会第 61 回年次大会、2006/3/27-30、愛媛大学城北
6. 堀川直顕 ; 「COMPASS による核子スピン構造の研究—COMPASS 大型偏極標的のアップグレード—」、日本物理学会第 61 回年次大会、2006/3/27-30、愛媛大学城北
7. 岩田高広 ; 「Study of spin structure of nucleon in COMPASS
—Upgrade of the polarized target and the spectrometer of COMPASS—」
Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (DPF2006+JPS200)
2006. Oct. 29-Nov. 03, Honolulu, Hawaii, USA
8. 松田達郎 ; 「Study of spin structure of nucleon in COMPASS
— measurement of transversity with a transversely polarized target —」
Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities (DPF2006+JPS200)
2006. Oct. 29-Nov. 03, Honolulu, Hawaii, USA
9. 岩田高広 ; 「COMPASS での核子スピン構造の研究」、KEK 核子構造関数ワークショップ、高エネルギー加速器研究機構、つくば、2007/1/11-12

誌上発表

1. The COMPASS polarized target.
N. Doshita, J. Ball, G. Baum, M. Finger, F. Gautheron, S. Goertz, T. Hasegawa, N. Horikawa, S. Ishimoto, T. Iwata, Y. Kiselev, J. Koivuniemi, K. Kondo, T. Matsuda, W. Meyer, S. Neliba, G. Reicherz,
Czech .J. Phys., **55**, A367-A374 (2005).
2. Measurement of the spin structure of the deuteron in the DIS region.
E.S. Ageev, T. Iwata, T. Matsuda, N. Horikawa and COMPASS collaboration.
Phys. Lett., **B612**, 154-164 (2005).
3. First measurement of the transverse spin asymmetries of the deuteron in

semi-inclusive deep inelastic scattering.

V.Yu. Alexakhin, T. Iwata, T.Matsuda, N.Horikawa and COMPASS collaboration. Phys. Rev. Lett., **94**, 202002 (2005).

4. Gluon polarization in the nucleon from quasi-real photoproduction of high- P_T hadron pairs.

E.S. Ageev, T. Iwata, T.Matsuda, N.Horikawa and COMPASS collaboration. Phys. Lett. **B633**, 25-32 (2006).