

偏極ビームと偏極標的を用いた核子スピン構造の研究

Study of nucleon spin structure by polarized beam and polarized target

山形大学	堂下 典弘
派遣期間	2017年4月1日～2017年12月21日
研究機関	European Organization for Nuclear Research (CERN), CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland
研究指導者	Dr. Gerhard Mallot

The nucleon, which is either a proton or a neutron, consists of valence quarks, sea quarks and gluons. The nucleon's spin of $1/2$ in units of Planck's constant is carried by the intrinsic spin of those fundamental particles and their orbital angular momenta. Since the nucleon spin structure research started in 1980s, many experimental results had indicated that the nucleon's spin cannot be explained by only the intrinsic spin contributions of the quarks and gluon. Therefore, the COMPASS experiment at CERN focuses on the orbital angular momenta of the quarks. In 2017 we used a polarized muon beam with a 2.5 m long liquid hydrogen target to measure Generalized Parton Distributions (GPDs) via Deeply Virtual Compton Scattering (DVCS) process. The total angular momentum of a given quark species is related to the GPDs. In 2018 we plan to use a solid polarized proton target with a pion beam to measure Transverse-Momentum-Dependent Parton Distribution Functions (TMDs) via polarized Drell-Yan process. The TMDs describe intrinsic transverse quarks momenta. In order to succeed the experimental programs I have prepared and operated the long liquid hydrogen target for the 2017 run and prepared the polarized target for the 2018 run as a target coordinator.

研究目的

物質を構成する原子は、核子（陽子・中性子）と電子からなっています。そして、核子は、クォークとグルーオンという素粒子から構成されていて、内部構造を持っていることが分かっています。しかしながら、核子内においてそれらの素粒子の描像は完全に明らかになっていません。核子のスピンの注目して核子のスピン構造を明らかにする事が研究目的です。

核子は、スピン $1/2$ を持っています。そしてスピン $1/2$ は、構成粒子であるクォークやグルーオンのスピン、そしてそれらの角運動量からなっています。しかし、それらの構成要素がどのように核子スピンを担っているのかはまだ分かっていません。1990年代以降、国際的に行なわれたクォークスピン測定、2000年代のグルーオンスピン測定によって、クォークとグルーオンのスピンだけでは核子スピンを説明できないことが分かりました。そのためヨーロッパ

原子核研究機構(CERN)の COMPASS 実験グループでは核子内のクォークの軌道角運動量に焦点をあてた研究を行ない始めました[1]。まず、クォークの軌道角運動量があるのかどうか？そして核子内におけるクォークの位置と動きに関する測定を行なっています。

研究経過

2017年では、偏極ミュオン粒子ビームと2.5m長の液体水素標的を用いて深仮想コンプトン散乱（Deeply Virtual Compton Scattering）の断面積と関係付けられている一般化されたパートン分布（Generalized Parton Distributions）関数の測定を行ないました（GPDプログラム）。一般化されたパートン分布関数は3次元核子トモグラフィーとして新たな核子構造のイメージング手段として注目しており、現在のCOMPASS実験のセットアップにお

いて4つある一般化されたパートン分布関数のうち2つ測定が可能であります[2]。また、散乱断面積は核子内における横方向のクォークの核子中心からの距離がわかります。これは“核子の Transverse イメージング”として知られており、Transverse サイズ測定のためのデータ収集も行ないました。また、クォーク軌道角運動により、散乱断面積にスピン非対称度が現れます。2018年の実験ではパイ粒子ビームとそのビーム方向に垂直にスピン偏極させた偏極固体核子標的によるドレル・ヤン過程を調べます（偏極ドレル・ヤンプログラム）。そして散乱断面積のスピン依存性から核子内のクォークの角運動に関わる横方向運動量依存のパートン分布関数（Transverse-Momentum-Dependent Parton Distribution Functions）のSivers、Transverse 運動量分布関数の抽出を行ないます。このSivers 分布関数にはQCD理論からの興味深い予測があります。それは、ドレル・ヤン過程のSivers 分布関数と深部非弾性散乱過程のSivers 分布関数とは互いに逆符号を持つ、というものです[3]。COMPASSは2007年と2010年に深部非弾性散乱でのSivers 分布関数の測定を行っており、同じ実験装置を用いて偏極ドレル・ヤンプログラムを行い、このQCD理論を通して核子スピン構造の理解を深めます[4]。

私は、標的グループの責任者として4月に2017年実験のために2.5m長液体水素標的システムの準備を行ないました。この液体水素標的システムは、2012年に行なったパイロットランにあわせて製作されたものです[5]。そのシステムの改良をしつつ実験の準備を行ないました。重要な改良点としては、液体水素の液面位置情報を把握できなかったことです。実験途中に一度装置を停止させ、ガス残量から再計算して液面を計算する必要がありました。そのため、液体水素の液面位置をモニタリングすべくシリコンダイオードを装着し、その信号の読み出しを行い、COMPASSのスローコントロールシステムヘデーターを送り、常に液面位置を把握できるようになりました。そして、5月

月上旬にシステムを冷却し始め、液体の温度を一定に保ためのレギュレーターの調整を行い、6月上旬から本格的にデータ収集を開始しました。そして、10月20日まで行なわれたデータ収集期間中、液体水素標的の温度は0.03%以内の安定性を実現できました。この温度から液体水素の密度を計算できます。密度はデータ解析による散乱断面積の算出する上で重要なパラメーターであり、その温度の安定性が直接実験データの不確定性となるのでとても重要です。

また、2018年の実験の準備を同時に行いました。標的の大きさは、直径4cmで長さが55cmの円筒形のセルをビーム軸に2つのセルを直列に並べます。数ミリサイズの粒の固体アンモニアをセルに充填して陽子の標的物質として使用します。固体アンモニアは、2011年に製作され、ほかのプログラムで使用してきました。現在液体窒素の中で保存されています。過去に使用した固体アンモニア粒に氷などの不純物が混入してしまったので、9月にそれらを取り除きました。10月下旬からは本格的に偏極標的システムの準備を行ないました。この偏極標的は重量5トンの超伝導磁石や到達温度50mKの冷凍機などから構成されており固体偏極標的としては世界最大級であります[6]。データ収集期間終了後、液体水素標的システムから偏極標的システムへの移行にあたり、CERNのテクニカルサポートチームとの打合せを頻繁に行いました。そのおかげで順調に11月に標的システムの設置、ヘリウム3循環用のパイプのインストレーションを滞りなく進めることができました。そして冷却システムの断熱真空用ポンプシステムのインストレーションを行い、断熱真空部のリークチェックを行ないました。

また、別のCERNのテクニカルサポートチームと、超伝導磁石システムの冷却、コミッションングのための準備を行ないました。実験で生成する中性子などの放射線によりコントロールシステムが影響をうけます。そのためシステムのCPUを移動を提案し、コンクリート、ポリエチレンとボロンカ

一バイトで囲いました。動的偏極法[7]を用いて陽子を2日間程度かけて80%以上の偏極度で実験します。2つのセルをそれぞれ反対方向に偏極させることでシステムの誤差を抑えることができます。また、ソレノイド磁石とダイポール磁石を用いることで偏極方向をビーム軸に垂直にさせることができます。偏極度を保ったまま偏極方向を変えるために2.5Tソレノイド磁石と0.6Tダイポール磁石を備えている超伝導磁石の新たなオペレーション方法を提案しました。

考察

COMPASS 実験グループは、15年間に渡り「核子スピン構造」の実験研究を行なっています。長期間になる理由は、必要とする散乱事象の確率がとても低いため実験自体が難しく、統計精度も必要となります。そのため、一つのプログラムに数年かけてデータ収集を行ないます。私は、今回の派遣において標的グループの責任者として液体水素標的の準備、運転を行いました。そして、散乱断面積を算出する上で重要な液体水素標的の密度を0.3%以内の誤差で保ちました。それにより、より質の良いデータ収集を実現できました。

2017年12月の段階で、収集したデータの中から必要と思われる事象だけのデータを選別する作業を行ない始めました。得られる一般化したパートン分

布関数は、いくつかのモデルによる計算予測も世界的に行なわれています。測定誤差が十分小さければそれらのモデルが測定値と合うかどうかも区別できるようになり、今回の実験データではそれも期待できます。つまり、モデル計算と実験測定の両面からのアプローチにより、核子の内部構造の理解がより深まることが期待できます。また、同時に2018年の実験で必要となる偏極固体陽子標的システムの準備もおこないました。2018年も標的グループの責任者として偏極標的システムの準備、運転を行なう事になり、偏極ドレル・ヤンプログラムのデータ収集を行ないます。

参考文献

- [1] COMPASS-II Proposal, SPSC - P340, CERN – SPSC – 2010 - 014
- [2] M. Burkardt, AIP Conf.Proc. 588 (2001) 199-203
- [3] J. C. Colins, Physics Letters B 536 (2002) 43
- [4] M. G. Alekseev, et al., Physics Letters B 692 (2010) 240
- [5] N. Doshita, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 746 (2014) 20 – 25
- [6] 堂下典弘 他, 日本物理学会誌 67 (2011) 905-913
- [7] S.T. Goertz, Nucl. Instr. and Meth. A 526 (2004) 28-42