

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2023年度
課題番号：20H05637
研究課題名：大型偏極ターゲットを用いた核子スピンのクォーク構造の解明

研究代表者氏名（ローマ字）：岩田高広（IWATA Takahiro）
所属研究機関・部局・職：山形大学・理学部・教授
研究者番号：70211761

研究の概要：

核子スピンの起源を実験的に探究する。クォークの軌道角運動量（OAM）寄与を示すため、重陽子偏極ターゲットを用いてスピン非対称度を測定する。Sivers 関数を決定し、OAM 寄与の存否を決定する。また Transversity 関数を抽出し、標準モデルを超える理論で予想される核子の電気双極子能率（EDM）の大きさに影響する Tensor-Charge を決定し、EDM の上限への示唆を与える。

研究分野：原子核物理学、素粒子物理学

キーワード：核子、スピン、QCD、標準モデル、偏極標的

1. 研究開始当初の背景

物質はどのようにできているのか？ 物質を構成するのは電子と、原子核を構成する核子（陽子と中性子）である。電子はスピン 1/2 を持つ素粒子で、その性質はよく理解されている。ところが、やはりスピン 1/2 を持つ核子の構造は十分に解明されていない。核子は、スピン 1/2 を持つクォーク 3 個が軌道角運動量： $L=0$ で結合した複合粒子で、核子のスピンはクォークスピンの合成と考えられてきた（クォークモデル）。ところが、クォークスピンの役割が少ないことが分かっている。結局、クォークスピン以外で核子のスピンの寄与しているものは何か？ は現在も不明で「核子スピンの起源の謎」と呼ばれる重大な問題になっていた。

起源の候補として第一に挙げられたのは相互作用に関与するグルーオンのスピン寄与である。グルーオンはスピン 1 を持ち、核子スピンの寄与できる。しかし、この測定は難しいため、まだ十分な精度の測定値が得られていない。しかし、この寄与が期待したほど大きくはないことは分かっている。

一方、クォークの軌道角運動量（OAM）にも注目が集まっている。従来のクォークモデルでは核子中のクォークの OAM はあり得ないが、実験データはその存在を示唆しつつある。

2. 研究の目的

本研究では核子スピンに対するクォークの OAM 寄与をクォークの種類を分けて示すため、特にこれまで不定性が大きい d-quark に感度が高い重陽子偏極ターゲットを用いて準包含深部非弾性散乱でのスピン非対称度を測定する。Sivers 非対称度から OAM に感度を持つ Sivers 関数を決定し、u および d-quark のそれぞれの OAM 寄与を抽出し、クォーク OAM 寄与の存否を決定する。また、同時に得られる Collins 非対称度から核子構造の一面を示す Transversity 関数を抽出する。これによって素粒子の標準モデルを超える理論で予想される核子の電気双極子能率（EDM）の大きさを与える中で重要な核子の行列要素 Tensor-Charge を決定し、EDM の上限への示唆を与える。

3. 研究の方法

クォーク OAM の効果は偏極した核子に高エネルギーのミュオンを入射して、反応で生成される粒子が左右どちらで検出されるか、その非対称の具合（非対称度）に現れる。これは Sivers 非対称度と呼ばれる。この非対称度が 0 でないならば、OAM が存在する証拠と考えられる。私たちは CERN の SPS 陽子加速器からの 160GeV のミュオンを大型偏極ターゲットに入射して、生成粒子を COMPASS スペクトロメ

ーターでとらえる。また、この測定では核子の Tensor-Charge (TC) の基となる Collins 非対称度も同時に得ることができる。素粒子の標準モデルを超える理論で予想される核子の電気双極子能率の程度はこの量に依存するので、非常に重要な量として認識されている。

4. これまでの成果

2020年12月までに偏極ターゲットの新型固体偏極励起用マイクロ波発振器の仕様を決定し、翌2021年の9月に納入されるよう、準備を整えた。これによって2021年度に偏極ターゲットをフルスペックで稼働できる目処が立った。

2021年の9月には偏極ターゲットを運転し、ビームを出して測定ができる状態にすることができた。このとき、短時間だがミュオンビームをターゲットに入射して予備的なデータを取得することができた。偏極ターゲットの偏極度は目的の40%以上を達成し、測定のための最低限の要求が満たされることが実証できた。しかし、CERNの加速器のスケジュールの制約によって、この年度の測定は断念せざるを得ない状況になった。

5. 今後の計画

「2022年度」

4月から偏極ターゲットを運転を開始し、5月に偏極励起を行い、ビーム実験可能な状況にする。6月からビームを入射してデータを収集を開始し、10月まで連続で実験データの収集を継続。その後、ターゲットの偏極度を決定するためのNMR較正測定を3週間に亘り行う。この間、偏極ターゲットの偏極励起、偏極反転、冷凍スピンモードでの偏極維持（マイクロ波による偏極励起は行わず極低温での磁場だけで偏極を維持するモード）、偏極度測定などの業務を行う。これらは日本グループのメンバーがCERNに出張し、COMPASS偏極ターゲットチームのメンバーと協力して行う。12月には偏極ターゲットセットアップから標的試料を取り出し、セットアップを撤収する。翌1月からターゲットの偏極度を導出するための解析を開始。並行して物理データの解析を開始する。この年度は膨大なデータから有意なデータを選択することが作業の中心となる。

「2023年度」

偏極ターゲットの偏極度を用いて物理データの解析を開始する。並行して測定器の検出効率を調べるためのモンテカルロ計算を行う。年末までに、Sivers非対称度などの予備的な結果を出せるように務め、2024年の初頭にはプレリミナリーな結果を国際会議などで発表できるようにする。非対称度を導出する解析プログラムはこれまで何度も利用してきたものを再度利用する。その後、解析を進め、最終結果を出し、論文にまとめる。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

まだ本格的な測定を行っていないため、該当なし。

7. ホームページ等

CERN COMPASS グループホームページ：<https://wwwcompass.cern.ch/>