

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340070

研究課題名（和文） FNAL-E906実験における陽子のスピン構造研究のための偏極ターゲットの開発

研究課題名（英文） Development of the polarized target for spin-structure studies of the proton in the FNAL-E906 experiment

研究代表者

後藤 雄二 (GOTO YUJI)

独立行政法人理化学研究所・延與放射線研究室・前任研究員

研究者番号：00360545

研究成果の概要（和文）：

高エネルギー加速器研究機構（KEK）に於いて、放射化アンモニア偏極陽子標的に対し、現状の設備で行える段階までの稼働に向けた準備を完了した。5 テスラ超伝導磁石の励磁、フッ素の熱平衡信号の検出に成功し、さらにポリエチレンビーズの陽子の熱平衡信号の検出に成功した。山形大では、偏極標的物質の開発として、放射化ポリエチレンファイバー、フォイルを用いた開発を進めた。偏極標的の試料作成のための電子線照射を行い、ESR 装置での電子スピン濃度の正確な測定を行った。

研究成果の概要（英文）：

We completed preparations toward operation of the polarized proton target from irradiated-ammonia to the stage where we can achieve with currently available equipments at KEK. The superconducting magnet was successfully excited, and thermal equilibrium signals of fluorine in the Teflon and proton in the polyethylene beads were observed. We have also advanced development of polarized-target materials with irradiated polyethylene fibers and foils at Yamagata University. The polyethylene samples were irradiated with electron beams to make polarized-target materials, and the spin density of the irradiated samples were measured precisely with the ESR.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

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：核子構造、偏極ターゲット、スピン、陽子、ドレル・ヤン実験

1. 研究開始当初の背景

当研究課題では、高エネルギー加速器研究機構（KEK）にあるターゲット長3cmの放射化

アンモニア偏極陽子ターゲットを整備・稼働し、将来のより大型の偏極ターゲット製作にむけた性能評価を行う。これは元々ミシガン

大学により開発、製作されたものであり、5テスラの磁場、1 K の温度で稼働する。

この実験において陽子のスピン構造として非常に重要な測定を行うことができる。陽子スピン1/2を説明するものとして、まず考えられるのは陽子を構成するクォークとグルーオン自身のスピンである。クォークのスピンの寄与は、偏極レプトン（電子、ミューオン）ビームと偏極陽子ターゲットを用いた深非弾性散乱(DIS)実験で測定される。CERNのEMC実験は1988年この方法により、クォークスピンの陽子スピンに対する寄与は小さいことを示した。これ以降、この問題は陽子のスピンパズルとして知られている。現在、EMC実験から20年が経過し、ついにグルーオンスピンの寄与もまた小さく、クォーク、グルーオンのスピンの和では陽子スピンを説明することはできないことがBNLのRHIC実験やCERNのCOMPASS実験のデータから示されつつある。残されたピースは陽子内部のクォーク、グルーオンの持つ軌道角運動量を測定することである。

陽子やパイ中間子などのハドロン同士の衝突による軌道角運動量の測定は、衝突方向に対して垂直方向のクォーク、グルーオンの運動量分布を表す拡張した分布関数を決定することにより行われる。この分布関数をハドロン衝突で最も精度よく決定できる反応過程がFNAL-E906実験で測定されるドレル・ヤン過程である。ドレル・ヤン過程はビームとターゲットの相互作用においてクォークと反クォークが対消滅して仮想光子になり、それがレプトン対に崩壊する過程である。この方法による陽子内部のクォーク、グルーオン分布の垂直方向の運動量分布を含む拡張した理解は、陽子スピンの理解、スピンパズルの解決を与えるものとして理論的研究も広く発展してきている。

CERNのCOMPASS実験などのレプトン散乱では偏極DIS実験でこの拡張した分布関数が得られるが、その結果と偏極ドレル・ヤン実験の結果との比較は理論的フレームワークのテストとして非常に重要な意味を持ち、偏極ドレル・ヤン実験の実現が待望されている。

2. 研究の目的

米国フェルミ国立加速器研究所(FNAL)におけるFNAL-E906ドレル・ヤン過程測定実験は、非偏極の陽子ビームと非偏極陽子及び重陽子ターゲットを用いて、陽子内部の反クォーク分布のフレーバー非対称性を精密に決定することを大きな目的としている。この実験において偏極陽子ターゲットを導入し、パイ中間子ビームを用いてドレル・ヤン実験を行うことにより、陽子のスピン構造として非常に重要な測定を行うことができる。それは陽

子スピンに対するクォークの軌道角運動量の寄与の測定である。この偏極ドレル・ヤン測定に必要なのは、高強度ビームに対して用いることのできる十分な大きさを持った偏極陽子ターゲットである。ドレル・ヤン過程の反応断面積は小さく、その精密測定のためには高強度ビームとターゲットの物質質量が必要となるからである。偏極陽子ターゲットの大型化は将来のFNAL-E906実験における

(また、将来J-PARC加速器施設で可能な同様の実験における)偏極ドレル・ヤン測定のために必要な最も緊急な課題である。このようなターゲットは低温を安定に保つことと、広範囲に対して均一な磁場が与えられることが必要とされる。当研究課題では、ターゲットの形状によるクーリング性能の向上を図り、低温を安定に保つための開発研究を主な目的とし、FNAL-E906実験を偏極ドレル・ヤン実験に拡大することを目指す。

3. 研究の方法

偏極ドレル・ヤン実験に必要なのは、高強度ビームに対して用いることのできる適当な大きさを持った偏極陽子ターゲットである。このようなターゲットは低温を保ち偏極を安定に保持することが必要とされ、高強度ビームの照射に対して発生する熱量を十分にクーリングできるか、放射線損傷に耐えられるか、また広範囲に対して均一な磁場が与えられるかが大きな開発要素である。当研究課題では、ターゲットの形状によるクーリング性能の向上を図り、低温を安定に保つための開発研究を主な目的とする。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)にある長さ3 cmの固体偏極陽子ターゲットを整備・稼働し、将来のより大型の偏極ターゲット製作にむけた性能評価を行う。これは元々ミシガン大学により開発、製作されたものであり、動的核偏極により偏極する。5テスラの磁場、1 Kの温度で稼働し、過去にBNL-AGS加速器での実験で用いられ、平均で85%の偏極度が得られていた。必要な設備として、低温設備(1 Kヘリウムの配管、断熱真空システム)を購入し、偏極ターゲットを整備、調整、稼働させる。NMRの発振器と信号処理系を購入し、NMRシステムを完成させ、5テスラの磁場によるテストを行う。偏極ターゲット物質に対する熱平衡状態をNMRで確認し、クーリング性能に関するテスト、評価を行う。また、マイクロ波発振器を別途手配できれば、動的核分極による偏極のテストを行う。このターゲットの長さは約3 cmが上限であり、偏極ドレル・ヤン実験で用いる50 cm程度の長さのためには将来、大型化した偏極陽子ターゲットの開発、製作が必要である。大型化を想定し 10^{10} パイ中間子/秒のビーム、ルミノシティ(輝度)でいうと $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程

度で用いるための性能評価を行う。現存する固体偏極陽子ターゲットの用途としては、これは現状の上限である。ターゲット物質としては放射化アンモニア (irradiated NH_3) をヘリウム4冷凍機でクーリングする。放射化アンモニアは放射線耐性に優れている。磁場の均一性に関しては、FNAL-E906 実験の磁石の漏れ磁場も考慮すべき要素である。磁気シールドまたは補正コイルにより 100 ppm 以下の均一性が保たれるかなど検討を進める。他の実験条件についてもシミュレーション計算による最適化を FNAL-E906 実験から得られる情報をもとに最適化を進める。また、山形大グループが参加している CERN の COMPASS 実験で用いられている 2.5 テスラの磁場、0.5K 以下の温度での偏極ターゲットの開発を並行して進める。ターゲット物質としてはポリエチレン繊維を用いる。繊維を用いることにより、大きな冷却性能を得るのに必要な大きな表面積を得ることが期待できる。繊維はまた変形させることが容易であるため、ターゲットとして加工することが容易である。安定性の向上のための新しいクライオスタットの建設、冷却テストを進める。この新クライオスタットを用いて、偏極ターゲット物質の開発を行う。

4. 研究成果

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) に於いて、KEK-PS 北カウンターホールに設置されている 5 テスラの磁場、1K の温度で動作させる放射化アンモニア偏極陽子標的 (ミシガン標的) に対し、現状の設備で行える段階までの稼動に向けた準備を完了した。このミシガン偏極標的を稼動させることにより、FNAL-E906 実験の発展として将来用いる偏極実験標的の開発プラットフォームを得ることができる。稼動の準備として 1K 断熱真空冷却装置を製作し、1K ヘリウムパイプ配管及び支持構造の建設、小型真空ポンプ・真空計・温度計・圧力センサーの設置、データ収集系の整備を行った。また 213MHz-NMR の発振器と信号処理系を統合したシステムを製作し、山形大の 2.5 テスラ磁石によるテストの後、KEK の 5 テスラ磁石による熱平衡信号の検出を行った。5 テスラ超伝導磁石の励磁、フッ素の熱平衡信号の検出に成功し、さらにポリエチレンビーズの陽子の熱平衡信号の検出に成功した (図 1)。今後、配線や試料の位置を再考し、信号検出の信頼度を高める。山形大では、2.5 テスラの磁場、0.5K 以下の温度で動作させる偏極標的システムを用いた偏極標的物質の開発として、放射化ポリエチレンファイバー及びフォイルを用いた開発を進めた。ファイバー及びフォイルを用いることにより、大きな冷却性能を得るのに必要な大きな表面積を得ることができる。新し

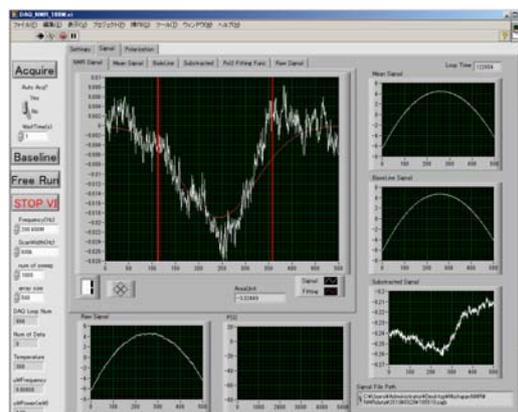


図 1 検出した陽子の熱平衡信号

いクライオスタットの開発、テストを行い、希釈冷凍機による 0.5K 以下の低温を達成した。また偏極標的の試料作成のための電子線照射を行い、80%以上の高偏極実現のため、ESR 装置での電子スピン濃度、ESR スペクトラ、スピン緩和時間の正確な測定を行った。図 2 に電子スピン濃度の測定結果を示す。スピン濃度は電子線強度 10^{16} 電子/cm² で飽和に向かうことが示され、スピン濃度として適当な値である 2×10^{19} スピン/g に調整する方法を確立した。

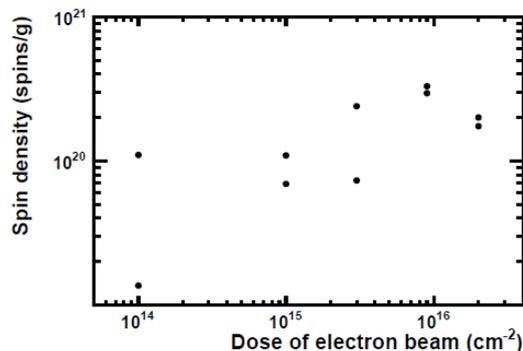


図 2 電子スピン濃度の測定結果

FNAL-E906 実験の発展としての偏極実験の議論としては、偏極陽子ビームを用いる実験の提案書を 2012 年に提出し、最初の段階の実験に対する承認を得た。偏極標的を用いる実験についても提案書を 2013 年に提出するための議論を進めている。

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 2 件)

- ① 後藤雄二, “Single transverse-spin asymmetry of very forward neutron production in polarized $p + p$

collisions at PHENIX”, Journal of Physics: Conference Series 389 (2012) 12034. 査読無

- ② 後藤雄二, “Internal-target polarized Drell-Yan experiment at RHIC”, Journal of Physics: Conference Series 295 (2011) 12166. 査読無

[学会発表] (計 11 件)

- ① 後藤雄二, 「FNAL における陽子のスピン構造研究のための偏極標的の開発」、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、東広島市、広島大学
- ② 後藤雄二, “High-Energy Spin Physics at J-PARC”, KEK theory center workshop on hadron physics with high-momentum hadron beams at J-PARC, 2013 年 1 月 18 日、つくば市、高エネルギー加速器研究機構
- ③ 後藤雄二, “Inclusive cross section and single transverse-spin asymmetry of very forward neutron production at PHENIX”, the 20th International Symposium on Spin Physics, 2012 年 9 月 17 日, JINR, Dubna, Russia
- ④ 松田洋樹、他、「COMPASS 偏極標的システムのための超音波モータを用いた大強度マイクロ波減衰器の開発」、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 25 日、西宮市、関西学院大学
- ⑤ 後藤雄二, “Sea-quark spin/flavor with Drell-Yan experiments”, INT workshop INT-12-49W Orbital Angular Momentum in QCD, 2012 年 2 月 15 日, Washington University, Seattle, USA
- ⑥ 後藤雄二、「核子スピン構造の研究の進展」、第 2 回総合スピン科学シンポジウム、2011 年 10 月 16 日、山形市、山形大学
- ⑦ 松田洋樹、他 COMPASS 偏極ターゲットチーム、「COMPASS 偏極標的マイクロ波系のための耐高出力減衰器の開発 3」、2011 年 9 月 17 日、弘前市、弘前大学
- ⑧ 後藤雄二、「ドレル・ヤン反応、陽子衝突型実験等を用いた研究」、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 26 日、新潟市、新潟大学
- ⑨ 松田洋樹、他 COMPASS 偏極ターゲットチーム、「COMPASS 偏極標的マイクロ波系のための耐高出力減衰器の開発 2」、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟市、新潟大学
- ⑩ 後藤雄二, “Internal-target polarized Drell-Yan experiment at RHIC”, 19th International Spin Physics Symposium, 2010 年 10 月 1 日, Julich, Germany

- ⑪ 後藤雄二、他 SeaQuest Collaboration, 「Fermilab-E906/SeaQuest 実験の立ち上げの現状」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、北九州市、九州工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 雄二 (GOTO YUJI)
独立行政法人理化学研究所・延興放射線研究室・先任研究員
研究者番号：00360545

(2) 研究分担者

深尾 祥紀 (FUKAO YOSHINORI)
独立行政法人理化学研究所・延興放射線研究室・協力研究員
研究者番号：80443018

中川 格 (NAKAGAWA ITARU)
独立行政法人理化学研究所・延興放射線研究室・専任研究員
研究者番号：60505668

石元 茂 (ISHIMOTO SHIGERU)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・講師
研究者番号：50141974

中野 健一 (NAKANO KEN-ICHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：20525779

宮地 義之 (MIYACHI YOSHIYUKI)
山形大学・理学部・准教授
研究者番号：50334511

堂下 典弘 (DOSHITA YASUNORI)
山形大学・理学部・助教
研究者番号：90451658

(3) 連携研究者

澤田 真也 (SAWADA SHINYA)
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：70311123

柴田 利明 (SHIBATA TOSHIAKI)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号：80251601