

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03694

研究課題名（和文）Fermilab-偏極ドレル・ヤン実験で探る偏極陽子内での反クォーク軌道運動

研究課題名（英文）Orbital motion of anti-quarks in the polarized proton studied by polarized Drell-Yan experiment at Fermilab

研究代表者

宮地 義之（Miyachi, Yoshiyuki）

山形大学・理学部・教授

研究者番号：50334511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：米国フェルミ加速器国立研究所において120 GeV陽子ビームと横偏極陽子標的による偏極ドレル・ヤン反応標的の非対称度測定実験（SpinQuest実験）を実現し、偏極陽子内での反クォーク軌道運動を明らかにし、QCDにおける積年の課題である「陽子スピンの起源」の解明に迫るものである。世界的新型コロナウイルス感染症パンデミックの影響により、当初計画で予定されていた測定実験開始には至らなかったものの、来るべきビーム供給にむけ、偏極陽子標的システムの構築、ドレル・ヤン反応からのミュオン粒子対検出のための検出器システムの準備を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スピンといった陽子固有の性質が、陽子を構成するクォークおよびクォークを結びつけるグルーオンからどのように生まれるのか？という問いは、それらの相互作用を記述する量子色力学に対する根源的な問いである。一方で、その強結合的性質により明確な答えを阻んできた。本研究課題が目指す偏極陽子内での反クォークの軌道回転運動は、その問いに対する実測的解答に欠けている最後のピースをはめ、少なくとも陽子スピンを構成する各要素とその動きを実験的に明らかにするものである。新型コロナウイルス感染症等の影響により測定には至らなかったものの、実験開始にむけた実験装置の準備を完了することができた。

研究成果の概要（英文）：We have realized the SpinQuest experiment at the Fermi National Accelerator Laboratory in the United States, which involves a 120 GeV proton beam and a transversely polarized proton target, aiming to measure the target asymmetry in a polarized Drell-Yan cross-section. This experiment unveils the orbital motion of anti-quarks within the polarized protons, bringing us closer to resolving the long-standing question of the "origin of the proton spin" in Quantum Chromodynamics (QCD).

Despite the impact of the global COVID-19 pandemic, the measurement experiment initiation initially planned in 2019 did not materialize. However, we have completed the construction of the polarized proton target system and prepared the detector system, which measures the muon pair from the Drell-Yan reaction in anticipation of the forthcoming beam supply.

研究分野：原子核物理学

キーワード：陽子スピンの謎 反クォーク 軌道回転運動 横偏極陽子標的 量子色力学 ドレル・ヤン反応

1. 研究開始当初の背景

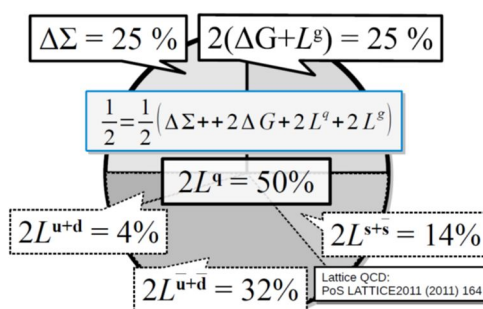
(1) 陽子に残された謎

我々の世界を作り上げる自然法則の理解は、その構成要素と相互作用の理解にほかならない。散乱実験により電子・原子核・核子(陽子・中性子)の存在と相互作用が理解され、それらのスピンと軌道角運動量をもって原子や原子核の三次元的内部構造の詳細が明らかになった。原子核を構成する陽子についても、三個の構成子クォークによる静的・静的理解から、グルーオンが伝えるクォーク間の相互作用である量子色力学(QCD)に基づく動的・三次元的理解へと発展し、世界的な研究領域へと醸成した。QCDの強結合的性質は、クォークからのグルーオン輻射、その乖離によるクォーク・反クォークの生成消滅による量子多体系として陽子を形成し、クォーク・グルーオンを「陽子の中に閉じ込める」。QCDは現在の素粒子物理学の基盤である素粒子標準模型の一つの理論的柱であるが、その力学を体現する陽子には未だに

- ・ 陽子半径の謎 分光的手法と散乱的手法による測定結果が約4%異なること
- ・ 陽子質量の謎 陽子質量はクォーク静止質量の数百倍であること
- ・ 陽子スピンの謎 陽子スピンへのクォークスピンの寄与は高々三割でしかないことが存在する。

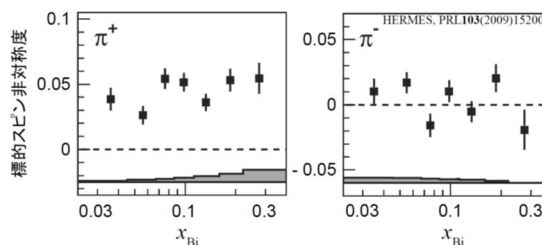
(2) 陽子スピンの謎

CERN-EMC 実験が『陽子スピン 1/2 はクォークのスピン和で説明できない(PLB206 (1988) 364)』事を明らかにして以来、この「陽子スピンの問題」はQCDにおける重要課題の一つである。QCDに従って陽子スピンはクォークおよびグルーオンのスピンとそれらの軌道角運動量に明解に分解され(PR541 (2014) 163)、研究代表者・分担者は様々な実験的手法によりクォークスピン( )が33%、グルーオンスピン(2G)がおおよそ40~60%である事を明らかにした(PRD 75 (2007) 012007 等)。格子QCDによる第一原理計算はクォーク軌道角運動量が陽子スピンの半分を担う事、特にその6割強を反クォークが占める事を予想していた(右図)。



(3) 深非弾性散乱での標的スピン非対称度測定

DESY-26.7 GeV 電子ビームと横偏極陽子標的による深非弾性散乱実験(HERMES 実験)を行い、大きな中間子生成の標的スピン非対称度を測定した(右図)。CERN-160 GeV μ 粒子ビームによる検証(COMPASS 実験)も行い、横偏極現象による実験的研究手法を確立した。この結果は横偏極陽子中でのクォーク軌道運動、特に + と - 非対称度の違いは互いに逆向きに陽子内を回転する u、d クォークの存在を示唆した。



(4) 現象論的解釈と「非普遍性」問題の検証

横偏極陽子内でクォークが軌道運動をしている場合、ビームから見る運動量は左右で変化する。小さな運動量をもつクォークはより多く存在するので、ある運動量比  $x_{Bj}$  のクォークに注目すると、左右で非対称に見える。陽子の色荷は全体で白色であることから、散乱されたクォークと残り部分の間には引力が生じ、上述のハドロン生成断面積に対称性が生じると解釈される。レプトン・クォーク散乱である深非弾性散乱を s-t 変換したものとドレムル・ヤン反応であり、上記の終状態引力作用は始状態斥力作用に対応する。その結果、同じクォーク軌道運動に起因するスピン非対称度であっても反応過程によって非対称度の符号が変化する「非普遍性」が生まれる。これはゲージリンクによるゲージ場理論の根源的な性質であり、横偏極現象解析基盤の有効性にとどまらずゲージ理論としてのQCDを検証するものである。CERN-COMPASS 実験でμ粒子ビームおよび中間子ビームによる散乱実験を行い、クォーク軌道運動によるスピン非対称度を深非弾性散乱および中間子ドレムル・ヤン反応でそれぞれ独立に測定し、非対称度が確かに「非普遍性」を示す直接的結果を得た。「横」自由度により拡張されたQCD解析についての実験的実証が得られ、残る反クォーク軌道運動研究への基盤が整った。

(5) 関連する国内外の研究動向

関連する実験研究に CERN - COMPASS 実験、ジェファーソン研究所(JLab)での深非弾性散乱実験がある。CERN-COMPASS では、中間子ビームおよび偏極μ粒子ビームを用いた実験が2018・2019年度に予定されていた。どちらも陽子中のクォーク軌道運動に感度を持つ測定である。JLabで

は、2018 年度以後 12 GeV 偏極電子ビームによる様々な陽子スピンに関する測定が計画されていた。COMPASS 同様クォークに感度を持つ測定であり、運動学的にも HERMES、COMPASS と相補的な役割を持つ。これらの実験に加え、BNL での偏極陽子衝突実験 (RHIC/Spin) による横偏極現象に関する様々な測定結果が報告されていた。異なるエネルギー領域での測定を受け、横偏極現象のエネルギースケール依存性に関する理論的理解もすすみ、実験結果を統括的に扱う物理解析 (グローバル解析) の手法が構築された。グローバル解析によりクォークの軌道運動に関する様々な情報が明らかになった反面、反クォークについては不確定性が大きいため、反クォーク軌道運動に関する直接測定結果が希求されていた。

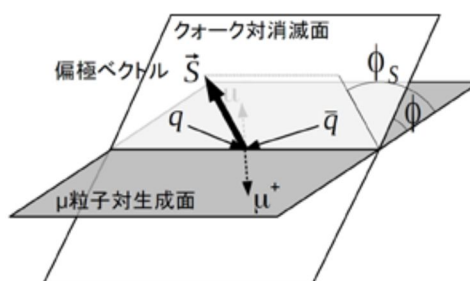
## 2. 研究の目的

本研究では、米国フェルミ国立加速器研究所 (Fermilab) - SeaQuest 実験に高強度対応型偏極陽子標的を組み込み、高強度陽子ビーム環境下での偏極陽子標的によるドレル・ヤン反応測定実験を世界ではじめて実現する (SpinQuest 実験: 実験番号 E1039)。当初計画では、2018 年度に陽子高偏極実現に必要な高出力マイクロ波システムを構築し、偏極標的を完成させる。平成 2019~2020 年度には、2 年間にわたる測定期間を通じて偏極標的と SeaQuest 検出器の定常的運転を実現する。最終年度にあたる 2021 年度には蓄積されたデータの物理解析を完了し、陽子内の反クォーク軌道回転に直接関係する反応断面積の標的スピン非対称度を測定精度  $\pm 0.04$  で決定し、現象論的モデルとの比較より陽子内反クォーク軌道運動を明らかにし、『陽子スピンの問題』の最終的決着とともに陽子内部構造の 3 次元的理解を目指す。

## 3. 研究の方法

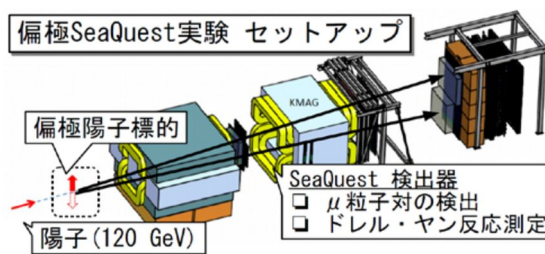
### (1) 断面積方位角依存性による陽子内部構造研究

偏極ドレル・ヤン反応ではクォーク対消滅面に対し、 $\mu$  粒子対生成面方位角  $\phi$  および標的偏極ベクトル方位角  $\phi_s$  の方位角が定義される。クォーク軌道運動は偏極ドレル・ヤン反応断面積のスピン非対称度の特徴的な方位角依存性を生じさせる。本研究では特に Sivers 非対称度として知られる  $\sin(\phi - \phi_s)$  振幅のスピン非対称度測定を行い、反クォークの軌道運動に関する直接的測定を実現する。



### (2) Fermilab-SpinQuest 実験

先行実験である SeaQuest 実験の検出器に新たに偏極陽子標的を構築し、SpinQuest 実験を実現する (本研究課題開始後に SpinQuest が正式名称として定められた)。検出器は  $\mu$  粒子対フォーカス用と運動量分析用の 2 つの電磁石、トリガー用ホドスコープ、 $\mu$  粒子飛跡検出器により構成されている。120 GeV 陽子ビームを用い、1 分毎に 5 秒間のスピル中に  $10^{13}$  個の陽子が標的に照射される。SeaQuest 実験の概要については高エネルギーニュース 34-2(2015)81 にまとめられている。



SeaQuest 実験の概要については高エネルギーニュース 34-2(2015)81 にまとめられている。

### (4) 研究体制

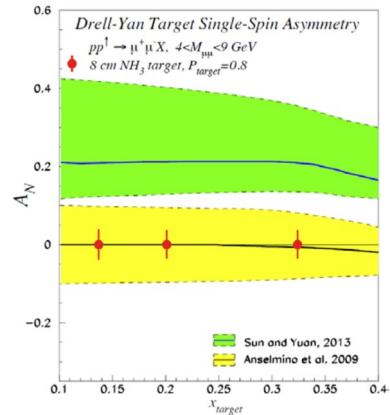
SpinQuest 実験は日本・アメリカ・台湾による国際共同実験である。山形大・東工大・理研・KEK から研究者・博士課程学生が参加する。SeaQuest 実験では、我々が製作・運転を担当したドリフトチェンバー (山形大・東工大) は、安定したデータ収集を支える主要な柱として高い評価を得た。その実績から中野 (東工大) は解析チームのリーダーとして主導的な立場を築いた。本研究では更に、偏極標的やトリガーシステムにも責任を持ち実験を推進する。主に宮地 (山形大)・後藤 (理研) と海外協力研究者 (M. Liu、ロスアラモス国立研究所 LANL) の連携の下で、特にマイクロ波システム等の準備をすすめる。2020 年度末に中野 (東工大) はバージニア大に転出。

### (5) SpinQuest 実験の当初計画

2019・2020 年度に約 2 年間の偏極 SeaQuest ビームタイムが予定されていた。測定開始にむけ、2018 年度に偏極標的システムやビームプロファイルモニタ等を新たに準備するとともに、既存の検出器の保守等をすすめる。特に偏極標的のマイクロ波システムの立上げに責任をもって、偏極標的の構築をすすめる。ビームタイム開始後は偏極標的および  $\mu$  粒子対検出で主要な役割をもつドリフトチェンバーの運転・性能評価に責任をもってあたる計画であった。

## (5) 到達目標

積算ルミノシティ  $3 \times 10^{43} \text{ cm}^{-2}$  での偏極ドレル・ヤン反応測定により、 $0.1 < x < 0.4$  の範囲でスピン非対称度を測定精度  $\pm 0.04$  で決定する（右図：誤差棒付き点）。陽子内部構造に関する様々な理論模型が提案されており、スピン非対称度の予想値が計算されている（右図：二つのバンド）。理論予想の不定性はこれまでの反クォークに関する間接的測定結果によるものであり、本研究での直接測定により理論模型の検証が実現する。その結果「反クォーク軌道回転」が明らかとなり、「陽子スピンの問題」の完全解明、究極的なクォークレベルでの3次元的な陽子内部構造の理解へと繋がる



## 4. 研究成果

### (1) 新型コロナウイルス世界的パンデミックによる影響

加速器や偏極標的システム準備状況等により当初 2019 年度に開始が予定されていたビーム供給開始に約 1 年の遅れが出ていたものの、各参加機関での実験準備は着々と進行しており、ビーム実験開始にむけ Fermilab での検出器システム・偏極標的システムの立ち上げ、またビーム供給開始後の実験実施体制準備等がすすめられていた。そんな折、2019 年末の中国武漢市ではじめての感染者報告がなされてから、わずか数カ月ほどの間に世界的なパンデミックへと進展した。渡航制限により検出器・偏極標的立ち上げ等のための Fermilab 出張を中止にせざるを得ないだけでなく、米国内での爆発的な感染状況拡大に対応するため、Fermilab 研究所自体がほぼ閉鎖されるといった状況になった。感染症対策の進展とともに、活動制限は徐々に緩和されていたが、検出器・偏極標的等が設置される実験エリアへの立ち入り・活動は人数的・時間的制約はおよそ二年にわたり制限され、本研究課題の進行に深刻な遅延をもたらした。

2019 年度のビーム供給後、約二年間にわたるドレル・ヤン反応断面積スピン非対称度測定を行う予定であったため、研究予算についてもビーム供給後には、Fermilab での検出器・偏極標的等の安定的運用のための Fermilab 出張や、必要となる消耗品調達に係る経費を占める計画となっていた。実際、2019 年度末には実験準備等のために Fermilab 出張が予定されていたが、急遽とられた休校措置等社会的状況から出張直前に中止とする判断をとるに至った。2020 年度以降は国内外での感染症対策の進展に合わせ、なるべくビーム実験開始にむけ、おもに偏極標的システムに不足している機器の調達、国内での試験、また渡航制限が続く中で現地共同研究者や Fermilab による技術的サポートにより活動制限の範囲の中での Fermilab での検出器・偏極標的準備をすすめるに至った。状況変化に対応する形で研究計画の見直しを行い、一年間の延長の後、2022 年度本研究課題は終了に至った。

### (2) SpinQuest 偏極標的システム構築

偏極標的システムは大きく分けて a)ヘリウム 4 冷却システム (1 K)、b)超伝導電磁石システム (5 T)、c)核磁気共鳴システム (200 MHz)、d)マイクロ波システム (140 GHz) がある。バージニア大学・ロスアラモス研究所との連携のもとで準備および Fermilab での各システム構築をすすめた。2022 年度にはほぼすべての機器について実験エリアへの設置が完了し、2022 年 12 月には超伝導電磁石を設定温度である約 4 K に、2023 年 1 月には標的試料セルを目標温度である 1 K に冷却する事に成功した。その他のシステムについても準備は完了し、ビーム供給開始にむけ偏極標的システム全体的な試験運転が行われた。以下に偏極標的システムに関して本研究課題による成果をまとめる。

ヘリウム 4 冷却器断熱真空用ターボ分子ポンプの調達・システム組込 (2018・2019 年度)

マイクロ波周波数測定系：

- 測定器調達・試験・システム組込 (2018・2019 年度)
- 周波数センサー調達・試験・システム組込 (2022 年度)

山形大での 200 MHz 核磁気共鳴測定開発

- 核磁気共鳴用電力増幅器調達・試験 (2020 年度)
- RF 発振器調達・試験・測定システム開発 (2021 年度)

Fermilab での冷却系・電磁石系構築：

- 試験用卓上型ターボ分子ポンプ調達 (2022 年度)
- ヘリウムガス流量計・コントローラ調達・試験・システム組み込み (2020 年度・2022 年度)
- 絶対圧真空系調達・試験 (2022 年度)

### (3) SpinQuest 検出器システム準備

ドレル・ヤン反応によって生成されるミュオン粒子検出には、先行実験である SeaQuest 検出器を利用する。SpinQuest 実験への最適化を必要とするものの、基本的には SeaQuest 実験終了後、休眠状態であった検出器の再開、不具合等の調査、必要な修繕対応等と、ビーム供給開始後の長期運転にむけた準備が主となる。検出器自体は実験エリアに設置されているため、活動制限緩和に合わせた形での対応をすすめた。実験エリア内作業に対する制限が緩和された 2021 年度には、Fermilab からの技術サポート等を活用し、確認されていた荷電粒子飛跡検出器の不具合等の修繕をすすめた。ビーム供給開始前の準備は完了した。

### (3) SpinQuest 実験の展望

当初計画にあるドレル・ヤン反応断面積非対称度測定は実現できなかったものの、実現に必要な準備を完了する事ができ、現在ビーム供給にむけた最終的な手続きがすすめられている。現時点では 2023 年度中には供給が開始される予定であり、本研究課題の成果が実を結ぶものと期待される。実施は「Fermilab ドレル・ヤン実験で探る陽子内反クォークのフレーバー・スピン構造 ( 研究課題番号 22H01244 )」によりすすめる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 K. Nakano et al.	4. 巻 53
2. 論文標題 Measurement of nuclear effects on anti-quarks via Drell-Yan process at FNAL-SeaQuest	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 80-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Y. Miyachi et al.	4. 巻 53
2. 論文標題 Progress of the polarized Drell-Yan experiment at Fermilab, SpinQuest (E1039)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 81-81
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 宮地義之
2. 発表標題 偏極ドレル・ヤン実験 Fermilab-SpinQuest (E1039)
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Yoshiyuki Miyachi
2. 発表標題 Polarized Drell-Yan experiment at Fermilab, SpinQuest (E1039)
3. 学会等名 the 24th International Spin Symposium (SPIN2021)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 宮地義之
2. 発表標題 偏極ドレル・ヤン実験 Fermilab-SpinQuest
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 中野健一
2. 発表標題 FNAL-SeaQuest 実験によるドレル・ヤン反応を用いた核子内反クォーク分布と原子核効果の測定
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 宮地義之
2. 発表標題 偏極ドレル・ヤン実験 Fermilab-SpinQuest(E1039)
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 中野健一
2. 発表標題 FNAL-SeaQuest 実験によるドレル・ヤン反応を用いた反クォークに対する原子核効果の測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 中野健一
2. 発表標題 Measurement of polarized Drell-Yan process at FNAL E1039/SpinQuest
3. 学会等名 The 11th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 柴田利明
2. 発表標題 Flavor asymmetry of quarks and antiquarks in the nucleon sea
3. 学会等名 The 11th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 宮地義之
2. 発表標題 偏極ドレール・ヤン実験 Fermilab-E1039
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 柴田利明
2. 発表標題 陽子と中性子のクォーク・グルーオン構造 - スピンはどのように作られているか -
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年～2019年



1. 発表者名 Kenichi Nakano
2. 発表標題 Measurements of parton structure of nucleons and nuclei via Drell-Yan process at Fermilab
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Yoshiyuki Miyachi
2. 発表標題 Measurement of proton induced Drell-Yan with the polarized nucleon targets at Fermilab-E1039
3. 学会等名 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Fermilab-SpinQuest実験 <a href="https://sites.google.com/quark.kj.yamagata-u.ac.jp/fermilab-spinquest/">https://sites.google.com/quark.kj.yamagata-u.ac.jp/fermilab-spinquest/</a> Fermilab-SpinQuest実験 <a href="https://sites.google.com/quark.kj.yamagata-u.ac.jp/fermilab-spinquest/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0">https://sites.google.com/quark.kj.yamagata-u.ac.jp/fermilab-spinquest/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	後藤 雄二  (Goto Yuji)  (00360545)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・前任研究員    (82401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	澤田 真也  (Sawada Shinya)  (70311123)	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・教授    (82118)	
研究分担者	中野 健一  (Nakano Kenichi)  (20525779)	東京工業大学・理学院・助教    (12608)	2021年3月に米国バージニア大学に転出

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 International workshop on the structure of the proton	開催年 2018年～2019年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関