

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01935

研究課題名（和文）J-PARCにおける核子中のチャーム対を含む5クォーク状態の実験的研究

研究課題名（英文）experimental study of 5-quark state including charm pair in nucleon at J-PARC

研究代表者

森野 雄平（Morino, Yuhei）

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・研究機関講師

研究者番号：50715240

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：採択年度より、J-PARC high-pビームラインが完成し、本研究のベースとなるJ-PARC E16実験の試験運用が開始された。本研究においてハード面は大部分をE16実験と共有するため、E16実験を軌道に乗せる事が必須であり、かつその上で本研究を進めるのに必要な情報を収集するという形で進めた。新規ビームラインにおいて立ち上げた実験であるため、供給ビームのバンチ的時間構造を始めとした予期せぬ困難が発生したが、それらを克服する対策を講じた結果、順調にデータ収集を可能とする事に成功した。本格的な物理データの収集は今後になるが、本課題採択により、本研究の十分な準備を進める事ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって明らかにしたこと、克服した困難のうちの一一定の割合は新規に建設したJ-PARC high-p ビームラインの固有の特性による物であった。このビームラインは本研究のみならず、今後様々な研究で活用される事が期待されており、本研究の波及効果はそれらに及ぶであろう。これが本研究の学術的、社会的意義だと言える。

研究成果の概要（英文）：The J-PARC high-p beamline was completed in the first fiscal year of this adoption, and the commissioning run of the J-PARC E16 experiment, which is the basis of this experimental study, started. Since most of the hardware in this research is shared with the E16 experiment, it was essential to get the E16 experiment on track, and then proceeded with collecting the information necessary to advance this research. Because this experiment was launched on a new beamline, unexpected difficulties arose, including the bunch-like time structure of the supplied proton beam, but by taking measures to overcome these, we were able to smoothly collect data. Although physics data collection will take place in the future, the adoption of this project has allowed us to make sufficient preparations for this research.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：原子核物理

1. 研究開始当初の背景

核子中のチャーム対を含んだ5クォーク Fock 状態 (intrinsic charm 以下 IC と略す)の有無は長年の大きな課題であった。これは、発展方程式で記述される摂動論的な海チャーム成分とは異なり、大きな運動量比(x)やクォーク-反クォーク非対称性という非摂動論的な価クォークと同様の特徴をもつ。IC の存在は p-A 衝突での J/ψ 前方生成抑制といった予期せぬ現象の解釈の鍵となってきた。一方その存在の実験的な検証は出来ておらず、その結果が待たれるところであった。p-A 衝突での J/ψ 前方生成抑制を IC による物と考えた場合、生成閾値近くの衝突エネルギーでは後方でも同様に生成抑制が起きるはずである。しかしながら、敷地付近の J/ψ の生成量の少なさ、後方測定の難しさからそのような測定は過去に存在しなかった。

そこで、2020年に新規に運用開始予定であった大強度の J-PARC high-p ビームライン(30GeV 1^{10} ppp)と、そこで最初実施予定の J-PARC E16 実験に着目して、E16 実験の次期計画として J/ψ 後方測定を行う構想を進めるために応募したのが本課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、J-PARC high-p ビームラインの 30GeV 陽子ビームと原子核標的の衝突で中央～後方に生成される J/ψ の測定による、IC の実験的実証である。ハドロン衝突での J/ψ 生成は、これまで多くの測定結果がある。しかし、それらは本研究より遥かに高いエネルギー領域で、かつ中央～前方の測定である。本研究のエネルギー領域、しかも後方 J/ψ 生成の測定結果は存在しない。その理由として、低エネルギー衝突での J/ψ の収量の少なさ、後方測定の難しさが挙げられる。本研究では、高強度ビームと後方大アクセプタンスの高レート耐性の検出器群によってこの困難を解決する。本研究は、これまで世界に例のない J/ψ 後方生成を広範囲にわたって測定を可能にすることを旨とするものである。

3. 研究の方法

本研究の実現のため着目したのが、J-PARC E16 実験である。E16 実験は、核物質中での ϕ の質量変化の実証を目標に、J-PARC high-p ビームラインにおいて 2020 年に実験開始された。後方大アクセプタンス、電子対測定への特化、高レート耐性が特徴である。標的は C, Cu, Pb 等を予定している。 J/ψ は電子対に大きな崩壊比 (~6%) を持っており、E16 検出器は本研究にとってほぼ必要な性能を備えている。本研究の進め方としては、基本的には E16 実験で取得するデータの中に本研究に必要な J/ψ 由来の電子対のデータを含ませる事で E16 実験と並行してデータ収集を可能とする方針を取る。E16 実験ではアクセプタンスのため測定できない中央付近(xF=0)に関しては、E16 実験終了後に標的の位置を変えたセットアップを用意し、固有のビームタイムを得て行う事を想定している。したがって、本研究を進める上では、新規のビームラインにおいて新規検出器群でおこなう J-PARC E16 実験を軌道に乗せる事が必須であり、そのうえで、本研究を進めるのに必要な情報を収集するという形で進めた。

4. 研究成果

本研究の採択年度より、想定実験箇所である J-PARC high-p 実験室およびビームラインが完成し、本研究のベースとなる J-PARC E16 実験のコミッションングランが開始された。そこで本研究ではまず始めに、2020-2021 年に行われた E16 コミッションングランを利用して実験遂行に必要な情報の収集を図った。初年度においては、スペクトロメーター下流に本研究の予算で作った独自のセットアップを用意して、実験標的から放出される高運動量の粒子に対して電子識別能力の評価を試みた。しかしながら、収集したデータに標的由来の粒子はほとんど含まれておらず、その理由は使用したトリガーの大半が accidental coincidence によって生成されている事であると判明した。これは事前に予想していない事態であるため、原因追及を行ったところ、high-p ビームラインには事前の予想とは異なる固有の時間構造が存在する事を発見した。具体的には、他の J-PARC ハドロン施設のビームラインと異なり、high-p ビームラインでは、陽子ビームが時間的にあまり平坦にはなっておらず、5.2usec 毎に平均値の倍以上のビームが供給される“バンチ構造”に近い時間構造をしている事が判明した。つまり 5GHz の陽子ビームを使用しているつもりが、現実に検出器が感じているビームレートは 10GHz を優に超えている、という状態となっていた。この時間構造は、本研究のベースとなる E16 実験にもトリガーリクエスト

の異常増大、DAQ live time の激減、飛跡検出効率の低下、という形で実験パフォーマンスに著しい悪影響を及ぼしていることも判明した。この状態では、本研究において目標とするデータ収集も成功の見込みが立たないため、この時間構造の低減および、その悪影響の除去が本研究における最重要課題となった。

以下では具体的に本研究内で行った対策について記述するが、簡潔にまとめる為に実際に行った時系列に沿った記述にはなっていない。行った対策は次の三つの項目に分けられる。

5.2usec バンチ構造を始めとしたビーム時間構造の低減

trigger レベルでの accidental の除去

DAQ 能力の向上

すなわち、様々なオフライン解析により、想定以上のビーム強度によって accidental trigger が大量に発生し、それがパフォーマンス悪化の主要因である事を突き止めたので、accidental の元となる時間構造を減らし、trigger 自身で accidental と判断して veto をかけ、それでも残る部分は DAQ 能力を向上させて取り切ってしまう、という方針である。に関して、high-p ビームラインの分岐部における運動量-位置の相関関係が 5.2usec 構造の主要因である疑いが強かったため、分岐部において無相関となるビーム光学を 2023 年に導入し、想定通り他のビームラインと同程度に 5.2usec 構造が低減する事を確認することに成功した。また、ビーム供給中にビーム軌道を変化させるシステムを導入し Hz レベルのマクロな時間構造を平坦化することに成功した。に関しては、当初 2020 年に作成した下流セットアップ内のホドスコープを再利用してビームハローをカウントし、それを veto 信号として利用する事を構想し、回路類の準備を進めてきた。しかしながら、オフライン解析を進めるうちに、E16 スペクトロメーター自身、具体的には飛跡検出器でカウントした粒子数で veto を作る方が効率的に accidental を除去できることが判明したので、最終的には後者を実装することとなった。に関しては、2020-2021 年のコミッションングラン時には使用していなかった E16 回路の buffer 機能を利用する事を構想したが、その場合データ収集の PC 部分がボトルネックとなって必要と見込まれるまでは向上しない事が予想されたので、予算を使ってサーバーの増強を行った。本課題終了後ではあるが、以上の対策を実施した上での 2024 年のデータ収集実績を図 1 に示す。青が trigger request であり、赤が accept である。約 2kHz の request に対し 90%近い live time を確保している。2021 年時には 1kHz request に対して live time 15%程度であった事、かつ 2021 年時の request の大半を占めていた accidental trigger の約 90%は 2024 年時には request 段階で既に除去されている事を考えると、劇的な改善が本研究による対策で達成されたと言える。

以上が本研究内で達成した最大の成果であると私は考えているが、その他に予算を使用することで、本研究用の実験標的チェンバーの製作や、大きなバックグラウンド元である実験室内のロスの発生個所の特定やその対策、予定標的位置に仮想標的を一時的に設置しての count rate および trigger rate の推定等を実行している。また、オフライン解析においても図 2 に示すように、標的の予定設置個所とほぼ同じ位置にある真空膜からの粒子を再構成することに成功しており、本研究における E16 スペクトロメーターの性能評価を着実に進めてきた。その他の活動として、J-PARC high-p ビームライン利用の将来構想を、様々な研究会や会議で、本研究を含め関係研究者と議論検討を行い、複数の国際学会等で発表を行ってきた。また、本課題実施区間に本研究の実験提案書を執筆し、J-PARC 課題審査会への提出を行った。

本課題の実施区間内には J-PARC 主加速器取り出し部の重故障によるビーム運転停止や、ハドロン電源棟火災によるビーム運転停止といった事前には中々予想のできないアクシデントに見舞われながらも、上述のように着実にデータ収集実施に向けた準備を進め、データ収集に必要な情報収集及び準備を完了することが出来たと考えている。

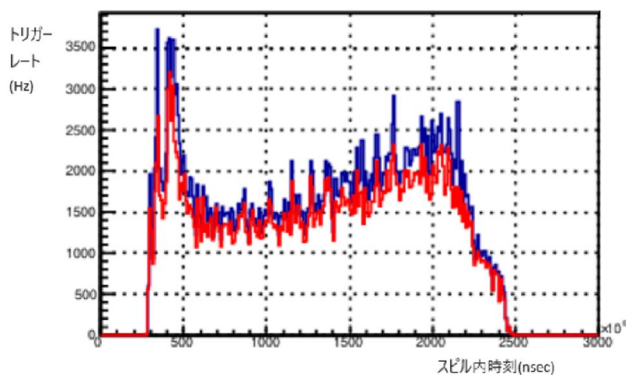


図 1. トリガーリクエスト/アクセプトの時間分布

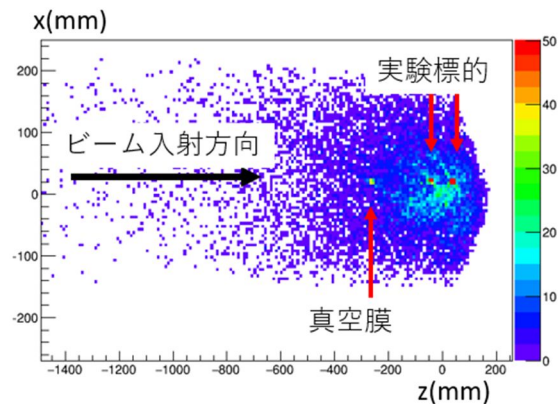


図 2 . 再構成した粒子生成点分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Ichikawa, ..., Y. Morino, et, al	4. 巻 16
2. 論文標題 Commissioning Runs of J-PARC E16 Experiment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Phys. Polon. Supp	6. 最初と最後の頁 A143.1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5506/APhysPoIBSupp.16.1-A143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Nakasuga, ..., Y. Morino, et, al	4. 巻 1041
2. 論文標題 Commissioning of the electron identification system for Dilepton measurement in pA collisions at J-PARC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nucl. Instrum. Meth. A	6. 最初と最後の頁 167335.1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2022.167335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Ozawa, ..., Y. Morino, et, al	4. 巻 142
2. 論文標題 Towards the Measurement of the Mass Modifications of Vector Mesons in a Finite Density Matter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Phys. Polon. A	6. 最初と最後の頁 399-404
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12693/APhysPoIA.142.399	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. N. Takahashi, ..., Y. Morino, ..., et al	4. 巻 68
2. 論文標題 Data Acquisition System in the First Commissioning Run of the J-PARC E16 Experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Nucl. Sci	6. 最初と最後の頁 1907-1911
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3087635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y.Morino
2. 発表標題 Study of charm component in the nucleon via J/ Λ measurement with the J-PARC E16 spectrometer
3. 学会等名 3rd international J-PARC HEF-ex Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y.Morino
2. 発表標題 A new experiment of di-electron measurements at the 1st stage of J-PARC Heavy-Ion Project
3. 学会等名 Quark Matter 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森野雄平
2. 発表標題 J-PARC-HI計画とその展望
3. 学会等名 J-PARC ハドロン研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森野雄平
2. 発表標題 J-PARC-HI計画と目指す物理
3. 学会等名 J-PARC ハドロン研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森野雄平
2. 発表標題 Monitoring and control systems for a new branched proton beam line in Hadron Experimental Facility at J-PARC.
3. 学会等名 2nd Virtual IEEE Real Time Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

proposal for J/ measurement https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_2201/pdf/P91_2022-04.pdf
--

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

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0件

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
---------	---------