

令和元年6月27日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02188

研究課題名(和文) 高運動量ハドロンビームを用いた精密ハドロン分光用大立体角汎用分析装置の開発

研究課題名(英文) Development of a General Purpose, Large Solid Angle Spectrometer for Precision Hadron Spectroscopy with High Momentum Hadron Beams

研究代表者

野海 博之 (NOUMI, Hiroyuki)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：10222192

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題によって、高運動量ハドロンビームを用いた精密ハドロン分光用大立体角汎用分析装置に係る、(1)大強度ビームに対応可能な高速ファイバー飛跡検出器、(2)粒子識別検出器に係る高時間分解能タイミング検出器、(3)次世代のトリガレス高効率高速データ収集システム、の開発を行った。また、(4)本研究がきっかけとなり、検出器の開発と汎用分析装置を用いた将来の共同利用研究に係る国際協力が進んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙における物質の形成と進化の解明は、今日の自然科学における重要課題であり、古来より人類が解を求めてきた謎である。クォークからどのようにハドロンが形成されるかはハドロン物理の基本的な課題であり、宇宙の多様な物質形成の根源に関わる問題である。強い力でハドロン内部に閉じ込められたクォークの動きを知るため、重いクォークをハドロンに注入し、ハドロンを励起させ、クォークの動きを炙り出す方法が有効である。我が国のJ-PARCは、大強度高運動量ハドロンビームを用いて、重いクォークを含むハドロンの励起状態の調べられる世界で唯一の施設である。このために必要な汎用分析装置に係る本研究成果は非常に意義が高い。

研究成果の概要(英文)：We have developed (1) high-speed scintillation fiber trackers, (2) high-time resolution time-zero counter, and (3) next-generation trigger-less, high-efficiency, high-speed data acquisition system, concerning a General Purpose, Large Solid Angle Spectrometer for Precision Hadron Spectroscopy with High Momentum Hadron Beams. During this Grant-in-Aid, we could develop international collaborative researches on detectors and possible future joint usage of the General Purpose, Large Solid Angle Spectrometer.

研究分野：ハドロン原子核物理学

キーワード：チャームバリオン チャームハドロン ダイクォーク 重いクォーク 大強度ビーム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

クォークからどのようにハドロンが形成されるかはハドロン物理の基本的な課題であり、宇宙の多様な物質形成の根源に関わる問題である。クォークの従う量子色力学（QCD）の基礎方程式はわかっているにも関わらず、低エネルギーでの非摂動性のために、ハドロンを記述することは一筋縄ではいかない。そのため、本来軽いクォークがカイラル対称性の自発的な破れにより質量を獲得し構成子クォークとなって実質的に有効な自由度として振る舞いハドロンを構成する、という描像に立った現象論模型（構成子クォーク模型）が一定の成功を収めてきた。しかし、近年報告が相次ぐ、4つのクォーク関与が濃厚な X, Y, Z, Z_b 粒子、5つのクォークを持つ Θ^+ 粒子および P_c 粒子といったエキゾチック粒子や古くからメソン・バリオン分子的構造の論争がある $\Lambda(1405)$ 粒子のような共鳴状態など、構成子クォーク模型の描像では説明できない粒子が数多く見出されてきた。こうした状況は、ハドロンを記述する上で、これまで顕わに扱われてこなかった QCD のカラー・スピン相関によるクォーク相関が重要な役割を果たしていることを示唆する。このことを確かめるために、ハドロン内部のクォーク相関の存在形態と性質を明らかにする必要がある。そこで、我々は、バリオンに重いクォークを導入し、クォーク相関（ダイクォーク相関[1]など）を際立たせる。重いクォークを含むバリオン励起状態の質量スペクトルや、生成と崩壊を系統的に測定し、観測量に反映されるクォーク相関の運動モード（集団的運動や内部励起）の情報を得る。

大阪大学核物理研究センターは、核物理分野の共同利用・共同研究拠点の事業の1つとして、高運動量ハドロンビームを用いた新しいハドロン物理の共同研究を立ち上げ、平成28年度からは拠点事業の1つとして概算要求を行った。核物理研究センターは、KEK 素粒子原子核研究所および J-PARC センターとの連携協力協定等に基づき、関係各者の連携協力を得て事業を推進する。我々は、新しい共同研究の中核となる、チャームバリオンの新しい分光実験（J-PARC E50[2]）を提案した。E50 実験は、J-PARC の実験課題審査委員会によって物理の重要性が認められ、stage-1 採択を獲得している。今後は、実験実施の準備を整えることが課題となっている。

[1] R. L. Jaffe, Phys. Rep. 409, 1(2005).

[2] E50: http://www.j-parc.jp/researcher/Hadron/en/Proposal_e.html#1301

2. 研究の目的

クォークから如何にハドロンが形成されるかハドロン物理の基本的課題に取り組む。多様なハドロン現象を特徴づける、量子色力学（QCD）特有のカラー・スピン相関によるクォーク相関がハドロンの形成に果たす役割を解明するため、バリオン内に重いクォークを導入し、バリオン内部のクォーク相関を浮き彫りにする。重いクォークを含むバリオン励起状態の質量スペクトルや、生成と崩壊を系統的に測定し、観測量に反映されるダイクォーク相関の運動モード（集団的運動や内部励起）の情報を得ることができる。J-PARC の高運動量高分解能大強度二次中間子ビームを用いて欠損質量法によるチャームバリオンの新しい分光研究を切り拓く。本研究課題では、この実験の基幹装置となる大立体角汎用分析装置を開発する。

3. 研究の方法

J-PARC の高運動量ビームラインの供給する 20 GeV/c の大強度 π^- ビームを用い、 $p(\pi^-, D^{*+})$ 反応によってチャームバリオン (Y_c^*) の質量スペクトルと生成断面積および励起状態からの崩壊モードとその分岐比を系統的に測定するため、大立体角汎用分析装置の開発を行う。大強度ビームや散乱粒子の高い多重度に対応しチャーム粒子を高い運動量分解能かつ大立体角で捉える高速かつ高空間分解能・低物質量の飛跡検出器を開発する。リングイメージチェレンコフ検出器を開発し、広い運動量領域について粒子識別性能を実証する。また、複数のトリガーを柔軟に実装できる新しいスキームの高速データ収集システムを開発し、多くの反応モードに対応できるハドロン物理の汎用分光装置を構築する。

4. 研究成果

本研究課題によって、高運動量ハドロンビームを用いた精密ハドロン分光用大立体角汎用分析装置に係る、(1) 大強度ビームに対応可能な高速飛跡検出器、(2) 粒子識別検出器に係る高速タイミング検出器、(3) 次世代のトリガレス高効率高速データ収集システム、の開発を行った。また、(4) 本研究がきっかけとなり、検出器の開発と汎用分析装置を用いた将来の共同利用研究に係る国際協力が進んだ。

(1) 高速飛跡検出器の開発

チャームバリオン分光では、毎秒 3 千万個の大強度 π^- 中間子ビームを用いる。反応を再構成するために、ビーム粒子と散乱粒子の両方について、それぞれの飛跡を測定する検出器が必要である。それらの飛跡検出器は上述の大強度ビームにさらされるため、応答時間の速い検出器が必須である。このため、応答時間の速い(約 10ns)シンチレーションファイバーをシート状に並べた飛跡検出器を開発した。0.5mm 径乃至 1mm 径のファイバー複数本をシートに並べて最適な樹脂接着剤で固めて固定した。東北大学電子光理学研究センターにおいて大強度電子ビーム環境下においてテスト実験を実施し、位置分解能 160 μ m、時間分解能 1 ナノ秒を達成した。高運動量ビ

ームラインで想定するビーム強度 (1mm 幅あたり毎秒 100 万粒子) の条件下で、シート当たり 97% の高い効率で飛跡の再構成に成功した。

(2) 粒子識別検出器の開発

各検出器で検出する粒子の検出器時刻の基準となるタイムゼロ (T0) 検出器の開発を行った。これは、粒子の飛跡と飛行時間から割り出す速度の測定精度を決定づける重要な検出器である。速度と運動量から粒子の質量が決まり、速度の測定精度は粒子識別の性能を左右する。本研究では、高速応答のチェレンコフ放射体としてアクリルを「X」字様に加工した検出器を開発した。「X」の左から水平にビームが入射する場合、光センサーは「X」字の 2 本の斜め線のそれぞれ右側端に設置する。「X」の開き角をチェレンコフ光の放射角度に合わせることで、2 本のアクリルでの放射光はそれぞれのアクリルに沿って進み、それぞれの光センサーに直達する。放射光路の広がりがないので時間分解能への影響が小さい。入射位置が上限にズレると、それぞれの放射光路長は異なるが、その平均値は一定なので、「X」字にすることで時間分解能への影響を抑えた。東北大電子光物理学研究センターにおいて大強度電子ビーム環境下においてテスト実験を実施し、毎秒 2~300 万粒子のビーム強度に対し 54 ピコ秒の高い時間分解能を達成した。開発した前置増幅回路にも改良の余地があることが分かり、今後さらなる向上が期待できる。

(3) 高速データ収集システムの開発

開発する大立体角汎用分析装置から送られてくるデータ量は毎秒 25 ギガバイトの想定である。大強度ハドロンビームの照射による様々な興味深いハドロン反応を包括的に取得するためには、従来のいわゆるトリガー方式 (検出器からの電気信号を組合せて論理回路を構成し必要な事象を選んで取り込む方式) では、様々な論理回路構成に対する柔軟性やデータ取り込み効率が著しく悪い。本研究では、トリガー方式に代わる次世代の高速データ収集システム (ストリーミング DAQ システム) を開発した。開発したシステムは、検出器からの信号をデジタル化しデータをほぼ選別なしに専用の計算機に取り込み、他の検出器からのデータを取りまとめる別の計算機プロセスによって事象の時系列化を行い、別の判定プロセスによって記録すべき事象の取捨選択を行う。これらは、すべて高速ネットワークで有機的に結合した計算機群によって並列処理される。共通のプログラミング言語で開発されているため、可搬性 (移植性) に優れ、事象選別に対する柔軟な対応が可能である。実験規模 (取り扱うデータ量) に合わせて並列度を調整することは容易である。

東北大電子光物理学研究センターの大強度ビームを用いた検出器群 (シンチレーション計数器 14 チャンネル、多線式飛跡検出器 30 チャンネル、ファイバートラッカー 128 チャンネル) を用いたテスト実験において、開発したデータ収集システムの実用試験が行われた。用いたネットワークプロトコルの限界速度である毎秒 6 ギガビット (1 ギガビットイーサネットを 6 系統使用) に対してほぼ 100% の驚異的に高い効率でデータの記録に成功した。これは、テスト実験とはいえ、ストリーミング DAQ システムを世界で初めて実用に供した例かもしれない。

(4) その他

①本研究に係る大立体角汎用分析装置に用いる大型の多線式飛跡検出器を開発した。これは、散乱粒子の飛跡を広い立体角にわたって測定するのに不可欠な検出器である。この検出器には、検出器ガスとして安全性の高い不燃性の CO₂ と Ar の混合ガスを使用する。また、大強度ビームが通過する部分のみを不感領域とするために対応する部分のバイアス電位を 0 にする工夫をする。多線式飛跡検出器の開発に当たっては、東北大電子光物理学研究センターの大強度ビームを用いて、混合ガスやバイアス電位操作がうまく作用することを、テスト機によって確認した。

②以下に、本研究がきっかけで進めることになった国際協力について以下に記す。

・台湾の中央研究院のグループと高速タイミング検出器の読出しに係る高速前置増幅器の開発を行った。これは、核物理研究センターが開発した高抵抗プレート検出器 (RPC) に特化した信号増幅整形回路で非常に速い応答を示す。大立体角汎用分析装置の検出器にも用いる。

・カナダの TRIUMF 研究所を中心としたニュートリノ振動実験研究グループが進めているニュートリノビーム生成に係るハドロン反応測定の国際共同実験 (EMPHATIC) と、高速タイミング検出器 (T0 と RPC) やアエロゲルを放射体を用いた粒子識別検出器の開発において協力した。高運動量ビームラインにおけるハドロン分光実験のための大立体角汎用分析装置は、ニュートリノビーム生成に係るハドロン反応測定に適しており、将来の共同利用が期待される。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1. Y. Matsumura et al. "Development of a transmittance monitor for high-intensity photon beams", Nuclear Instrument and Method A902, 103-109(2018)、査読有
2. T. Ishikawa et al., "Non-strange dibaryons studied in the $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ reaction", Physics Letters 789, 413-418(2018)、査読有
3. H. Noumi, "Strange and Charm Hadron Physics at J-PARC in Future", JPS Conf. Proc. 117, 111003(2017)、査読有
4. T. Ishikawa et al., "Study of non-strange dibaryon resonances via coherent double neutral-pion photoproduction on the deuteron", Proceedings of Science, Hadron2017, 65(2018)、査読有

5. T. Ishikawa et al., “Low-energy Scattering Parameters Between the eta Meson and Nucleon from eta Photoproduction on the Deuteron”, Acta Physica Polonica B48, 1801-1806(2017)、査読有
6. H. Noumi, “Physics in J-PARC Hadron-Hall Extension”, JPS Conf. Proceedings 13, 10017(2017)、査読有
7. Takatsugu Ishikawa, Hisako Fujimura, Ryo Hashimoto, Yuki, Honda, Takashi Ishida, Hiroki Kanda, Satoshi Kido, Yuji Matsumura, Manabu Miyabe, Ikuro Nagasawa, Ken'ichi Nanbu, Hajime Shimizu, Koutaku Suzuki, Ken Takahashi, Atsushi O. Tokiyasu, Yusuke Tsuchikawa, Hirohito Yamazaki, “Development of a high-intensity photon-beam profile monitor”, Conference Record of IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference 2016, 2016、査読有
8. H. Nagahiro, S. Yasui, A. Hosaka, M. Oka, H. Noumi, “Structure of charmed baryons studied by pionic decays”, Physical Review D95, 14023(2017)、査読有

[学会発表] (計 30 件)

1. 白鳥昂太郎, 浅野秀光, 赤石貴也, 荒巻昂, 五十嵐洋一, 石川貴嗣, 梶川俊介, 小谷野忍, 佐甲博之, 高橋智則, C.-Y. Chang, W.-C. Chang, 永井慧, 長崎吉宏, 西浦一樹, 野海博之, 本多良太郎, Y. Ma, 他J-PARC E50コラボレーション, “大強度二次粒子ビーム測定用シンチレーションファイバー飛跡検出器の開発”, 日本物理学会第74回年次大会 (2019年)、2019年3月、九州大学、福岡
2. 赤石貴也, 浅野秀光, 荒巻昂, 五十嵐洋一, 石川貴嗣, 梶川俊介, 阪口篤志, 佐甲博之, 白鳥昂太郎, 高橋智則, C.-Y. Chang, W.-C. Chang, 永井慧, 野海博之, 本多良太郎, Y. Ma, 他J-PARC, E50コラボレーション, “チャームバリオン分光実験用ビームタイミング検出器の開発”, 日本物理学会第74回年次大会 (2019年)、2019年3月、九州大学、福岡
3. K. Shirotori et al., “Charmed baryon spectroscopy using a hadron beam at J-PARC”, 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
4. H. Noumi, “overview of J-PARC E50 experiment”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
5. Y. Komatsu, “High-momentum beam line for Secondary beams”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
6. K. Shirotori, “E50 Spectrometer System”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
7. K. Shirotori, “Baryon Spectroscopy”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
8. R. Honda, “Hyperon-Nucleon Interaction: YN scattering”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
9. F. Sakuma, “Kaonic Nuclei”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
10. K. Aoki, “Meson in Nucleus”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
11. K. Nagai, “Nucleon Structure (Drell-Yan)”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
12. T. Yamaga, “E50 RICH and beam Cherenkov”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
13. T.N. Takahashi, “Front-end Modules: E50”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
14. Y. Ma, “Streaming DAQ: E50”, RCNP Workshop on “Physics with General Purpose Spectrometer in the High-momentum Beam Line” (国際学会), August 2018, RCNP, Ibaraki, Osaka
15. 赤石貴也, 浅野秀光, 阪口篤志, 白鳥昂太郎, 高橋智則, 野海博之, 本多良太郎, 他J-PARC E50コラボレーション, “MPPCを使用した大強度ビーム測定用高速応答・高時間分解

- 能検出器の開発(2)”, 日本物理学会2017年秋季大会, 2017年9月, 宇都宮大学、宇都宮
16. 小松雄哉, 浅野秀光, 白鳥昂太郎, 高橋智則, 野海博之, Seongbae Yang, “J-PARC E50実験における焦点面検出器のためのMulti-pixel photon counterの放射線耐性の評価”, 日本物理学会2017年秋季大会, 2017年9月, 宇都宮大学、宇都宮
 17. 赤石貴也, 浅野秀光, 石川貴嗣, 阪口篤志, 佐甲博之, 白鳥昂太郎, 高橋智則, 野海博之, 本多良太郎, S. B. Yang, Y. Ma, 他J-PARC, E50コラボレーション, “MPPCを使用した大強度ビーム測定用高速応答・高時間分解能検出器の開発(高レート使用試験)”, 日本物理学会第73回年次大会, 2018年3月、東京理科大学、野田
 18. H. Noumi, “Strange and Charm Baryon Spectroscopy at J-PARC”, 6th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2017) (国際学会), August 2017, Crete, Greece
 19. H. Noumi, “Charm Physics with Meson Beam at J-PARC”, ETC* workshop on “Dilepton Productions with Meson and Antiproton Beams” (国際学会), November 2017, ETC*, Trento, Italy
 20. H. Noumi, “High-momentum beam line and upgrade plan in the extended hadron hall”, International Workshop on the Project for the Extended Hadron Experimental Facility of J-PARC (国際学会), March 2018, J-PARC, Tokai, Japan
 21. K. Shirotori, “J-PARC E50 Experiment”, International Workshop on the Project for the Extended Hadron Experimental Facility of J-PARC (国際学会), March 2018, J-PARC, Tokai, Japan
 22. H. Asano, “Exploring diquark correlations by charmed baryon spectroscopy at J-PARC”, The 10th APCTP-BLTP/JINR-RCNP-RIKEN Joint Workshop on Nuclear and Hadronic Physics (国際学会), August 2016, RIKEN, Wako, Japan
 23. H. Noumi, “Charmed Baryon Spectroscopy via the (π, D^{*-}) reactions”, The 34th Reimei WorkShop “Physics of Heavy-Ion Collisions at J-PARC” (国際学会), August 2016, J-PARC, Tokai, Japan
 24. T. N. Takahashi, “Experimental investigation for diquark degrees of freedom in a charmed baryon at J-PARC”, The 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016) (国際学会), July 2016, Kyoto University, Kyoto, Japan
 25. H. Noumi, “Physics in J-PARC Hadron-hall extension”, The 14th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2016) (招待講演) (国際学会), July 2016, Kyoto University, Kyoto, Japan
 26. H. Noumi, “Charmed-hadron Physics and Physics of Hadron-hall extension at J-PARC”, KEK Theory Center WS on Hadron and Nuclear Physics at J-PARC (国際学会), January 2017, KEK, Tsukuba, Japan
 27. K. Shirotori, “Spectroscopy of charmed baryon by using hadron beam at J-PARC”, Workshop on “Structures and Interactions of Heavy Quark Hadrons” (国際学会), March 2017, J-PARC, Tokai, Japan
 28. H. Noumi, “Baryon Spectroscopy with Heavy Flavors at J-PARC”, International Workshop on Strangeness Nuclear Physics 2017 (招待講演) (国際学会), March 2017, Osaka E. C. University, Neyagawa, Japan
 29. Takatsugu Ishikawa, “Development of a high-intensity photon-beam profile monitor”, IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (招待講演) (国際学会), December 2016, Strasbourg, France
 30. 白鳥昂太郎, “J-PARC高運動量ビームラインにおけるチャームバリオン分光実験”, ELPH研究会 C015 「マルチフレーバーで探るエキゾチックハドロンとハドロン多体系の物理」(招待講演), 2016年12月、東北大電子光理学研究センター、仙台

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~noumi/puki/E50/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：白鳥 昂太郎
ローマ字氏名：SHIROTORI, Kotaro
所属研究機関名：大阪大学
部局名：核物理研究センター
職名：助教
研究者番号（8桁）：70610294

研究分担者氏名：石川 貴嗣
ローマ字氏名：ISHIKAWA, Takatsugu
所属研究機関名：東北大学
部局名：電子光物理学研究センター
職名：助教
研究者番号（8桁）：40400220

(2)研究協力者

研究協力者氏名：小沢 恭一郎
ローマ字氏名：OZAWA, Kyoichiro

研究協力者氏名：宮地 義之
ローマ字氏名：MIYACHI, Yoshiyuki

研究協力者氏名：菅谷 頼仁
ローマ字氏名：SUGAYA, Yorihiro

研究協力者氏名：成木 恵
ローマ字氏名：NARUKI, Megumi

研究協力者氏名：高橋 智則
ローマ字氏名：TAKAHASHI, Tomonori

研究協力者氏名：小松 雄哉
ローマ字氏名：KOMATSU, Yusuke

研究協力者氏名：YANG Seongbae
ローマ字氏名：YANG, Seongbae

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。