

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247048

研究課題名(和文)カイラル対称性の部分的回復による原子核中での中間子質量変化の測定

研究課題名(英文) Measurements of meson mass modification in nuclei due to the partial restoration of chiral symmetry

研究代表者

四日市 悟 (Yokkaichi, Satoshi)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号：20360670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円

研究成果の概要(和文)：ハドロン(陽子、中性子、中間子など)の質量はヒッグス機構のみならず大部分がカイラル対称性の自発的破れによるという、2008年ノーベル賞を得た南部の提唱になるこの考え方の実験的検証をめざして、原子核内部でのベクトル中間子の電子陽電子対への崩壊を世界一の高精度高統計で系統的に測定するための専用スペクトロメータをJ-PARCハドロン実験施設に建設すべく検出器と読出回路の開発と製作を行った。また、テスト実験で達成した検出器性能にもとづくシミュレーション計算により、中間子質量変化の検出感度を評価し、スペクトロメータの約1/3(26モジュール中8モジュール)完成時点における検出可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The origin of hadron mass is thought to be due to the spontaneous breaking of chiral symmetry, not only the Higgs mechanism, as Nambu advocated. In order to obtain the experimental evidence of the idea, we proposed the systematic measurement of vector meson mass in nuclei with the world best resolution and statistics through the di-electron decay at J-PARC hadron experimental facility. In order to construct a spectrometer for the experiment, we have developed the GEM tracker, Hadron blind detector and read-out electronics, and produced a part of them which consist the spectrometer. Also, by the simulation based on the achieved performance of the developed detectors, we evaluated the sensitivity to the spectral modification of the phi meson using the limited number of the detectors, only eight modules out of 26 modules originally proposed.

研究分野：原子核物理学

キーワード：実験核物理 放射線X線粒子線 GEM チェレンコフ検出器 電子検出器 飛跡検出器 カイラル対称性
量子色力学

1. 研究開始当初の背景

ヒッグス機構によりクォークやレプトンは質量を持つが、クォークから構成されるハドロン（陽子、中性子、中間子など）の質量の大部分は、クォーク質量の和をこえて、強い相互作用の結果カイラル対称性の自発的破れによって作られると考えられている。しかし、実験による直接的検証はなされていない。高温高密度において期待される、破れたカイラル対称性の回復は、ハドロンの質量スペクトルの変化にあらわれると考えられており、とくにベクトル中間子の電子対またはミューオン対崩壊の測定による質量スペクトルの変化は、すでに高エネルギー重イオン衝突実験や、低エネルギーでの光子・陽子入射による実験などで観測されている。しかしそのスペクトル変化の様態は必ずしも同じでなく、その起源については解釈が定まっていない。

我々はKEK-PSにおいて遂行したE325実験において、世界で初めて陽子入射実験によりベクトル中間子の電子対崩壊による質量スペクトルの変化を検出し、2001年から2007年にかけて発表した。とくに ϕ 中間子のスペクトルの変化の観測は入射チャンネルにかかわらず世界初であった。この実験の特長を伸ばし、J-PARCにおける高精度高統計での系統的測定により質量変化現象の起源を解明する、ひいてはハドロン質量の起源を解明しようというのが本研究の着想であり、目的である。この実験計画は、J-PARCハドロン実験施設に建設される高運動量ビームラインを使用するE16実験としてJ-PARC PACに提案され、2007年に物理採択されていた。

2. 研究の目的

J-PARCハドロン実験施設に電子陽電子対を測定する新スペクトロメータを建設し、世界一の高精度かつ高統計でベクトル中間

子 (ρ 、 ω 、 ϕ) の電子陽電子対崩壊による質量スペクトルを標的原子核を変えつつ系統的に測定する。スペクトロメータの概念図を図1に示す。

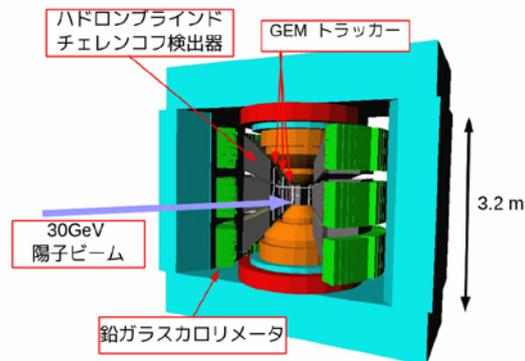


図1 スペクトロメータ概念図

この測定により、原子核中で崩壊した中間子の質量が変化することを確認し、かつその変化の原子核サイズ依存性や運動量依存性を測定して、この質量変化がカイラル対称性の回復によると考えられるか否かをあきらかにする。

3. 研究の方法

理化学研究所およびKEKにおいて、電子検出器とその読み出し回路の開発と量産をおこなった。

電子検出器のうち、粒子飛跡検出器(GEMトラッカー、GTR)とハドロンブラインドチェレンコフ検出器(HBD)は、CERN(欧州原子核研究機構)で開発されたGEM(ガス電子増幅器)を用いて、最大で5 kHz/mm²という高頻度のバックグラウンドのもとで運転できる。鉛ガラスカロリメータ(LG)については、KEKに保管されているTOPAZ実験の鉛ガラスを再利用する。

HBD 用 GEM の読み出しには、CERN で開発された ASIC である APV25s2 を使用して CERN の RD51 共同研究により開発されたプリアンプを用いる。GTR 用には同じく APV25s2 を用いて 2 倍の高密度実装を行ったプリアンプを開発した。双方とも RD51 開発の SRS システムを用いて読み出す。LG については PSI 開発のアナログメモリーセル ASIC である DRS4 を用いたフラッシュ ADC を開発した。

トリガーロジックモジュールには BelleII 実験用に開発された UT3 と FTSW を転用する。GEM からトリガー信号を取り出すためのプリアンプ用の ASIC を開発した。

なお、2012 年度補正で予算化され、KEK により 2013 年度に建設が開始された J-PARC の高運動量ビームラインの使用を前提として本科研費による研究を推進してきたが、計画書提出（2013 年 10 月）時点では 2015 年度末とされていたビームライン自体の完成予定時期は 2017 年 1 月現在で 2019 年前半へ延期されている。

4. 研究成果

スペクトロメータは 26 モジュールから構成されるが、予算制約を考え第一段建設予定を 8 モジュールとしている。別途資金も含め、そのうち、開発・調達完了したものを列挙する。

検出器については

- GEM トラッカー (GTR) 6 モジュール分
- ハドロンプラインド検出器 (HBD) 2 モジュール分

の GEM や読出基板、mesh 電極。

-GTR 用 CFRP 製フレームについては 5 モジュール分の部品（うち 2 つを組み立てた。

図 2)

- HBD のガス筐体については不感領域を減

らすため 2 モジュール一体のものを開発し、4 モジュール分を調達。（図 3）

- 鉛ガラスカロリメータ (LG) 8 モジュール分の鉛ガラス加工終了。



図 2: CFRP 製フレームにとりつけた GTR の 1 モジュール分 (検出面積 100mm 角、200mm 角、300mm 角で 1 セット)

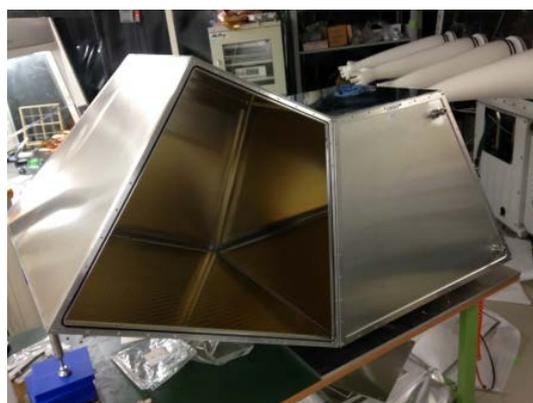


図 3: 開発した二連タイプ HBD 筐体

読出回路については量産に移行し以下の調達を完了した。

- GTR 用プリアンプ 8 モジュール分

- GTR/HBD 読出用 CERN 製 SRS 回路 5 モジュール分
 - GTR 読出補助回路(リピータボード) 8 モジュール分
 - LG 読出回路(DRS4 チップを使用したフラッシュ ADC) 2 モジュール分
- トリガー用回路については GTR 用トリガー ASIC を開発、放電保護回路つきトリガー回路基板とあわせてテスト中である。

ソフトウェアでは、テスト実験で得た GEM トラッカーの分解能を再現する GEM シグナルシミュレータと、高バックグラウンドヒット環境 (GTR で最大 5 kHz/mm²) における粒子飛跡トラッキングソフトウェア、同じくテスト実験で得た HBD および LG の性能をとり入れた検出器シミュレータを開発、それらを用いた収量評価を行い、第一段階 8 モジュールで期待される収量での ϕ 中間子質量スペクトル変化の検出感度を評価した。質量変化の形としては (A) E325 実験の結果を再現する Breit-Wigner 形からの単純な変形(通常原子核密度で質量 3.4% 減少、崩壊幅 3.6 倍) [Phys. Rev. Lett, 98, 042501]、(B) Gubler-Weise による hadronic な計算によるスペクトル関数 [Nucl. Phys. A954, 125] の 2 つを想定した。いずれもカイラル対称性の回復を仮定した QCD sum rule にもとづく計算と矛盾しない。1280 時間(約 50 日)の data 収集で、銅標的について E325 実験の 6 倍、およそ 15000 個の ϕ 中間子を収集することができ、いずれの仮定でも質量変化の存在を確定可能であるとした(図 4)。

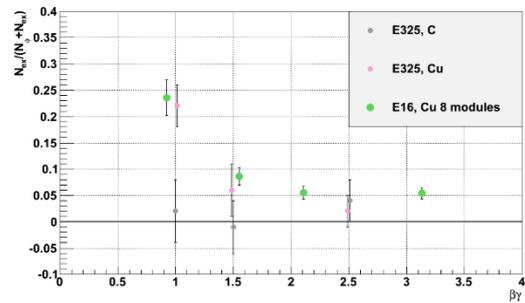


図 4: E16 実験 (第一段階 8 モジュール・1280 時間のデータ収集)における銅標的中の ϕ 中間子質量変化の検出感度 (緑)。本文中 (A) 型の質量変化を仮定して、Breit-Wigner 型で fit したときに残る変形部分の数 (Nex) と全体の数 (Nphi+Nex) との比とその統計エラーを中間子の速度 $\beta\gamma$ の関数として plot したものである。E325 実験の結果 (赤) と比較して、質量変化の存在のみならず、質量変化分の中間子速度依存性も有意に検出できるようになり、現象の確定に寄与する。

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 6 件)

1) "Measurement of the Vector Meson Spectral Modification in the Nuclear Medium at J-PARC"

Y. Komatsu, K. Aoki, S. Ashikaga, T. Chujo, H. En'yo, S. Esumi, H. Hamagaki, R. Honda, K. Kanno, A. Kiyomichi, S. Miyata, Y. Morino, H. Murakami, R. Muto, W. Nakai, M. Naruki, H. Noumi, Y. Obara, K. Ozawa, T. Sakaguchi, H. Sako, S. Sato, F. Sakuma, S. Sawada, M. Sekimoto, K. Shigaki, T. Shibukawa, H. Sugimura, T. N. Takahashi, S. Yokkaichi, Y. S. Watanabe (J-PARC E16 Collaboration)

JPS Conf. Proc. 13, 020005 (2017) [査読有]

2) "Development of a hadron blind detector using a finely segmented pad readout"

K. Kanno, K. Aoki, Y. Aramaki, H. En'yo, D. Kawama, Y. Komatsu, S. Masumoto, W. Nakai, Y. Obara, K. Ozawa, M. Sekimoto, T. Shibukawa, T. N. Takahashi, Y. S. Watanabe, S. Yokkaichi

Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research, A 819 (2016) 20-24[査読有]
3) "The electronics, online trigger system and data acquisition system of the J-PARC E16 experiment"
T N Takahashi, E Hamada, M Ikeno, D Kawama, Y Morino, W Nakai, Y Obara, K Ozawa, H Sendai, M M Tanaka, T Uchida and S Yokkaichi
J. Phys.: Conf. Ser. (JPCS), 664, 082053 (2015) [査読有]
4) "The Application of DAQ-Middleware to the J-PARC E16 Experiment"
E Hamada, M Ikeno, D Kawama, Y Morino, W Nakai, Y Obara, K Ozawa, H Sendai, T N Takahashi, M M Tanaka and S Yokkaichi
J. Phys.: Conf. Ser. (JPCS), 664, 082016 (2015) [査読有]
5) "Development of GEM trigger electronics for the J-PARC E16 experiment"
Y. Obara, E. Hamada, M. Ikeno, D. Kawama, Y. Morino, W. Nakai, K. Ozawa, H. Sendai, T. N. Takahashi, M. M. Tanaka, T. Uchida and S. Yokkaichi
J. Phys.: Conf. Ser. (JPCS), 664, 082043 (2015) [査読有]
6) "Measurement of Vector Meson Decays in Nuclei at J-PARC"
Y. Morino, K. Aoki, Y. Aramaki, H. En'yo, H. Hamagaki, J Kanaya, K. Kanno, D. Kawama, A. Kiyomichi, Y. Komatsu, S. Masumoto, H. Murakami, R. Muto, W. Nakai, M. Naruki, Y. Obara, K. Ozawa, F. Sakuma, S. Sawada, M. Sekimoto, T. Shibukawa, K. Shigaki, T. N. Takahashi, Y. S. Watanabe, S. Yokkaichi (J-PARC E16 Collaboration)
JPS Conf. Proc. 8, 022009 (2015) [査読有]

[学会発表] (計 36 件)
(国際招待講演のみ列举)

1) S. Yokkaichi, "The J-PARC E16 experiment: Measurements of spectral change of vector mesons in nuclear matter", HDNM2017, 2017/3/28-31, Weizmann Inst. (Rehovot, Israel)
2) S. Yokkaichi, "Measurements of spectral change of vector mesons in nuclear matter", HINT 2016, 2016/12/5-8 IQBRC(Tokai, Japan)
3) K. Aoki, "Experimental study of vector mesons in nuclear medium at J-PARC", New perspectives on Photons and Dileptons in Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions at RHIC and LHC, 2015/11/30-12/11, ECT* (Trento, Italy)
4) S. Yokkaichi, "Measurement of vector mesons in nuclei: J-PARC E16 experiment", HHIQCD 2015, 2015/3/5, YITP (Kyoto, Japan)
5) K. Aoki, "Meson-mass modification experiment at the high-momentum beamline of J-PARC",

Hadron physics with high-momentum hadron beams at J-PARC 2015, 2015/3/13-16, KEK (Tsukuba, Japan)
6) K. Aoki, "Study of in-medium mass modification at J-PARC"
WPCF 2014 (Xth Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy), 2014/8/25-29, Karoly Robert College (Gyongyos, Hungary)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

四日市 悟 (YOKKAICHI, Satoshi)
国立研究開発法人理化学研究所
・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号 : 20360670

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

高橋 智則 (TAKAHASHI, Tomonori)
国立研究開発法人理化学研究所
・仁科加速器研究センター・客員研究員
研究者番号 : 80612134

青木 和也 (AOKI, Kazuya)
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・助教
研究者番号 : 70525328

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・助教
研究者番号 : 50715240