

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21105004

研究課題名(和文)カイラル対称性の破れによる質量生成機構の実験的解明

研究課題名(英文)Experimental study of the mass-generation mechanism due to the chiral symmetry breaking

研究代表者

延與 秀人(En'yo, Hideto)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員

研究者番号：30213606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 243,200,000円、(間接経費) 72,960,000円

研究成果の概要(和文)：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、カイラル対称性の自発的破れによるものとされる。2008年ノーベル賞の南部によって提案されたこの考えの実験的検証のため、原子核内でのベクトル中間子の質量スペクトルの変化を電子対崩壊により世界一の高精度高統計で系統的に測定する。このためのGEM(ガス電子増幅器)を用いた電子検出器、すなわちGEM飛跡検出器とハドロンブラインドチェレンコフ検出器を開発・製作した。J-PARCハドロン実験施設のE16実験として2016年に測定を開始予定である。

研究成果の概要(英文)：The mass generation mechanism of hadrons due to the spontaneous breaking of chiral symmetry in QCD, which is proposed by Nambu, are widely accepted. In order to verify this idea experimentally, we will measure the mass modification of vector mesons in nuclei systematically with the best mass-resolution and statistics in the world. We have developed and made detectors using GEM, namely, GEM Tracker and Hadron-blind Cherenkov detector, to perform a new experiment E16 at J-PARC Hadron experimental facility. The first beam will be delivered in 2016.

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：実験核物理 放射線X線粒子線 GEM チェレンコフ光検出器 飛跡検出器 電子検出器 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）の質量の大部分はヒッグス機構をこえて、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、とくにベクトル中間子の電子対またはミュ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  $\phi$  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。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 ( $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\phi$ ) の電子対崩壊による質量スペクト

ルを系統的に測定する。スペクトロメータの概念図を図 1 に示す。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、カイラル対称性の回復によるものか否かをあきらかにする。

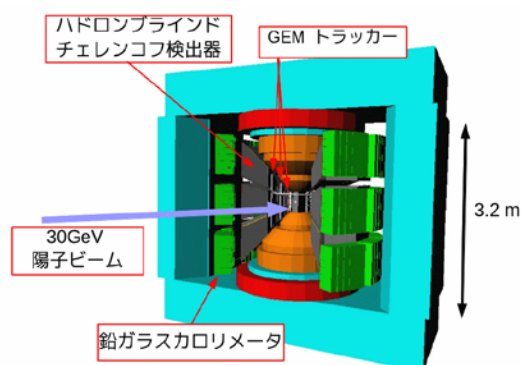


図 1 スペクトロメータ概念図

## 3. 研究の方法

理化学研究所、東京大学、KEK において、電子検出器とその読み出し回路の開発、スペクトロメータ磁石の改造部品の製作をおこなった。東大の学生および理研の PD が開発の中心となり、ビームを用いたテスト実験を、東北大 ELPH, SPring-8/LEPS, J-PARC ハドロン実験施設、理研 RIBF において計 10 回遂行し、製作した検出器の性能を確認した。

電子検出器のうち、粒子飛跡検出器 (GEM トラッカー) 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  $5 \text{ kHz/mm}^2$  という高頻度のバックグラウンドのもとで運転できる。国内企業との協力により、大型の GEM の国産化を行った。また、HBD については、これを実用化した米国 BNL の PHENIX 実験との協力により開発をおこなった。

#### 4. 研究成果

(1) 電子検出器(上述 GEM トラッカー、HBD、および 鉛ガラスカロリメータ検出器)の開発は終了し、量産を開始した。J-PARC においては、研究開始当初の予定より遅れていた高運動量ビームラインの建設も予算化され、2016 年には E16 実験としてビーム使用開始の予定である。

(2) GEM トラッカーに関しては、信号のタイミング情報の利用により、粒子が斜めに入射した際における位置分解能の悪化を防ぐ方式を実用化した。また、測定粒子への影響を極力小さくするための低物質質量二次元読出ストリップ基板を開発した。3種類のサイズ(100mm 角、200mm 角、300mm 角)のそれぞれについて性能を確認した。100/200mm 角の量産型一号機の写真を図2に示す。

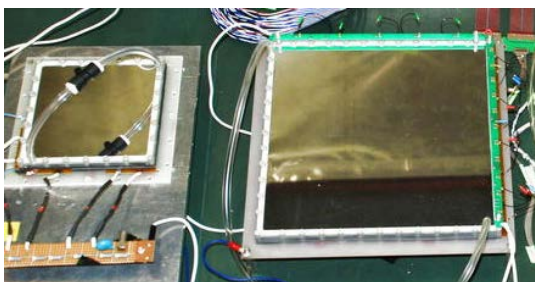


図2 GEM トラッカー量産型

(3) GEM 読み出し回路については、CERN との協力により、CERN 製 ASIC を用いた 256 チャンネルの小型プリアンプ(図3)を開発し、その利用により GEM トラッカーの位置分解能を最高で従来の 80 ミクロンから 60 ミクロンに改善できた。飛跡位置分解能の入射角度依存性を図4に示す。

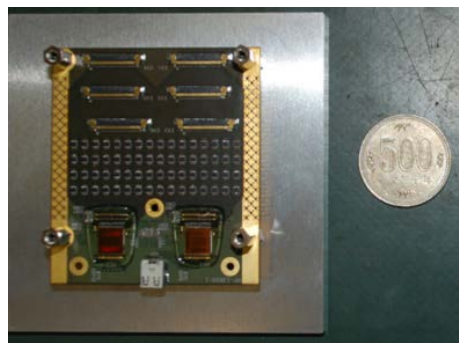


図3 小型プリアンプ量産型

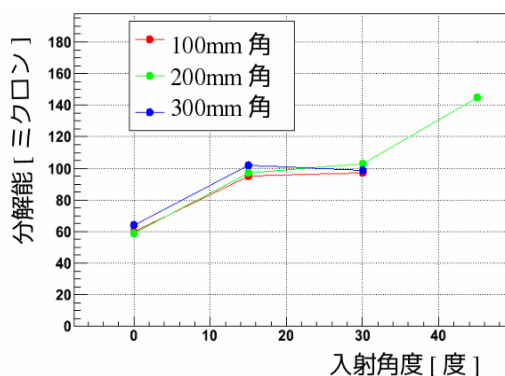


図4 GEM トラッカーの飛跡位置分解能の入射角度依存性。

(4) HBD については、量産型一号機(図5)で入射角度 0 度の電子に対して平均光電子数 11 個を確認し、斜め 15 度入射に対しても通過距離が長くなる分で計算通りに増加することを確認した。(図6)

一方、読み出しパッドのサイズの最適化と信号のあるパッド数を用いた解析の導入により、最終的な電子識別能力(パイ粒子棄却能力)を3倍以上向上できることをテスト機で確認した。(図7)



図5 HBD 量産型一号機

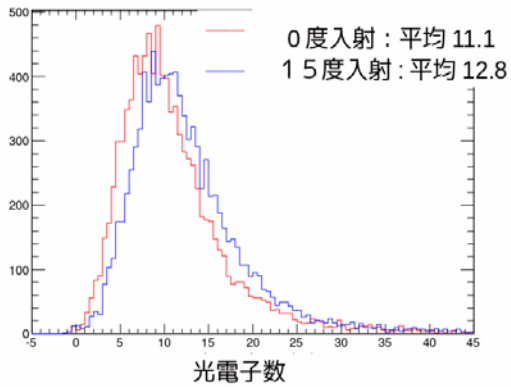


図6 入射する電子から検出されるチェレンコフ光電子数

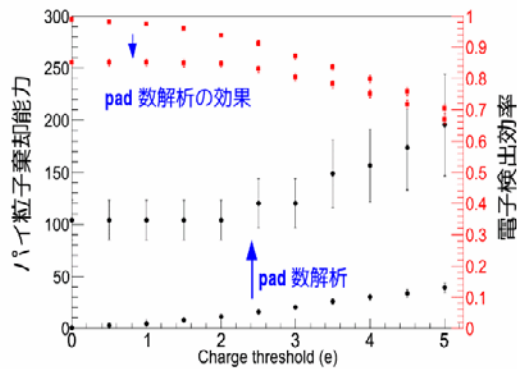


図7 HBD テスト機による パイ粒子棄却能力の向上

(5) 国内企業との協力により、最大 300mm 角のカプトン製 GEM の化学エッチング方式による安価な量産を国産でまかなえる態勢をととのえた。今後国内で製作される GEM 検出器への供給も可能である。

(6) このカプトン製 300mm 角国産 GEM (図 8) が、J-PARC での実験で予想される量の十数倍である毎時 80-90 mSv という中性子バックグラウンドの中でも、HBD で用いる  $\text{CF}_4$  ガス中で放電に対して安定に運転できることを理研 RIBF でのテストで確認した。

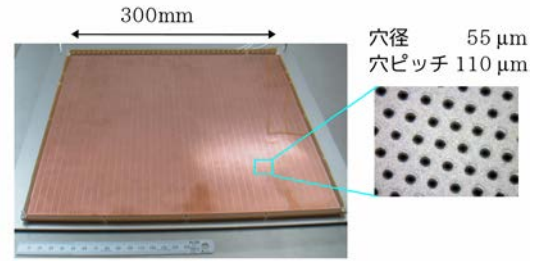


図8 国産 GEM(300mm 角)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

(1) "A Development of the GEM tracker for the J-PARC E16 experiment"

Yusuke Komatsu, Kazuya Aoki, Yoki Aramaki, Hideto En'yo, Koki Kanno, Daisuke Kawama, Shinichi Masumoto, Wataru Nakai, Yuki Obara, Kyoichiro Ozawa, Michiko Sekimoto, Takuya Shibukawa, Tomonori Takahashi, Yosuke Watanabe, Satoshi Yokkaichi

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 732 (2013) 241-244 [査読有]

(2) "Experimental Investigation for Mass Modification of Vector Mesons at J-PARC"

Daisuke Kawama, Kazuya Aoki, Yoki Aramaki, Hideto En'yo, Hideki Hamagaki, Junpei Kanaya, Koki Kanno, Akio Kiyomichi, Yusuke Komatsu, Shinichi Masumoto, Yuhei Morino, Hikari Murakami, Ryotaro Muto, Wataru Nakai, Megumi Naruki, Yuki Obara, Kyoichiro Ozawa, Fuminori Sakuma, Shin'ya Sawada, Michiko Sekimoto, Takuya Shibukawa, Kenta Shigaki, Tomonori Takahashi, Yosuke Watanabe, Satoshi Yokkaichi

JPS Conf. Proc. 1, 013074(2014) [査読有]

(3) "Experimental Investigation for Mass Modification Effect in Nuclei at J-PARC"

Daisuke Kawama, Kazuya Aoki, Yoki Aramaki, Hideto En'yo, Hideki Hamagaki,

Junpei Kanaya, Koki Kanno, Akio Kiyomichi, Yusuke Komatsu, Shinichi Masumoto, Yuhei Morino, Hikari Murakami, Ryotaro Muto, Wataru Nakai, Megumi Naruki, Yuki Obara, Kyoichiro Ozawa, Fuminori Sakuma, Shin'ya Sawada, Michiko Sekimoto, Takuya Shibukawa, Kenta Shigaki, Tomonori Takahashi, Yosuke Watanabe, Satoshi Yokkaichi  
PoS(Hadron 2013)178 (2014) [査読無]

(4) "A development of HBD for the J-PARC E16 experiment"

K. Aoki, H. En'yo, T. Gunji, H. Hamagaki, J. Kanaya, Y. Komatsu, S. Masumoto, K. Ozawa, T. Sato, M. Sekimoto, T. Tsuji, K. Utsunomiya, Y. S. Watanabe, S. Yokkaichi  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 628, 300-303, (2011) [査読有]

[学会発表] (計 72 件)

(1) M. Naruki, "Experimental studies on medium modification of vector mesons" Hirschegg 2014: Hadrons from Quarks and Gluons (International Workshop XLII on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations), 2014/1/12-18 (Hirschegg, Kleinwalsertal, Austria)

(2) M. Naruki, "Experimental studies on medium modification of hadron mass", Hadron 2013, 2013/11/4-8 (Nara, Japan)

(3) D. Kawama, "Experimental Investigation for Mass Modification Effect in Nuclei" Hadron 2013, 2013/11/4-8 (Nara, Japan)

(4) K. Kanno, "Development of the Hadron Blind Detector for the J-PARC E16 experiment", IEEE NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM 2013, 2013/10/27-11/2 (Seoul, Korea)

(5) 小沢恭一郎, "高運動量ビームラインと核物質中でのハドロン質量の変化" (シンポジウム J-PARC 高運動量ビームラインのハドロン物理), 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/09/20, 高知大学(高知市)

(6) Kazuya Aoki, "Mass modification of vector mesons", New Hadron Spectroscopies/Dynamics, 2012/11/21, Pusan, Korea

(7) 四日市 悟, "核物質中での質量の変化と QCD での質量獲得機構" (シンポジウム J-PARC ハドロン施設の近未来), 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012/09/13, 京都産業大学(京都市)

(8) Kyoichiro Ozawa, "Measurements of meson mass at J-PARC", Zimanyi 2011 winter school on Heavy Ion Physics, 2011/11/30, MTA KFKI RMKI (Hungary)

(9) Satoshi Yokkaichi, "Vector meson measurements through dielectron: planned experiment at J-PARC" Workshop "Electromagnetic Probes of Strongly Interacting Matter: Status and Future of Low-Mass Lepton-Pair Spectroscopy", 2010/9/17, ECT\* (Trento, Italy)

(10) Satoshi Yokkaichi, "Vector meson in nuclear medium, experiments at KEK and J-PARC" NFQCD 2010 Symposium of 'Exotic Hadron' and 'Hadrons in Nuclei' 2010/2/18 YITP, Kyoto

(11) Ryotaro Muto, "Measurement of vector meson mass in nuclear medium using  $p + A$ " US-Japan Joint Workshop on Meson Production Reactions at Jefferson Lab and J-PARC 2009/10/12 Hawaii's Big Island, U.S.A.

(12) Yosuke Watanabe, "Development of GEM detectors for a large acceptance phi meson spectrometer" Hawaii 2009 3rd joint meeting of the nuclear physics

divisions of the JPS and APS 2009/10/15  
Hawaii's Big Island, U.S.A.

〔図書〕(計 1 件)

"In-medium mass modification of vector mesons", Satoshi Yokkaichi, Lecture notes in physics 781 (Particle and nuclear physics at J-PARC), Springer, (2009), 161-193

〔その他〕

アウトリーチ活動

(1) 理化学研究所一般公開

方位磁石を用いた「対称性の自発的破れ」の演示模型(図9)を製作し(2011)、J-PARCE16 実験ポスターとともに展示、説明した。



図9「対称性の自発的破れ」の演示模型：外乱を与えたあと緩和を待つと磁区構造ができる(左上)。

(2) 一般むけ講演[計3件]

延與 秀人, 「私たちはなぜ重いかー宇宙誕生・天地創造・万物創生、ヒッグス粒子から超重元素までー」 ONSA 25周年記念講演会, 2014/1/27、大阪大学中之島センター(大阪市)

延與 秀人, 「私たちはなぜ重いのかーヒッグス粒子から超重元素までー」, 知的刺激週間スペシャル講演会, 2012/10/29、西武学園文理中学・高等学校(埼玉県 狭山市)

延與 秀人, 「宇宙誕生 100 万分の 1 秒後の謎」, 埼玉県民の日 特別講演  
2011/11/14, 埼玉県立総合教育センター(埼玉県 行田市)

新学術領域「新ハドロン」ホームページ  
[http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new\\_hadron/index.html](http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/public/new_hadron/index.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

延與 秀人(EN'YO, Hideto)

理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員

研究者番号: 30213606

(2) 研究分担者

四日市 悟(YOKKAICHI, Satoshi)

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

小沢 恭一郎(OZAWA, Kyoichiro)

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: 20323496

武藤 亮太郎(MUTO, Ryotaro)

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: 50392147

(3) 連携研究者

佐久間 史典(SAKUMA, Fuminori)

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: 10455347

清道 明男(KIYOMICHI, Akio)

高輝度光科学研究センター・制御・情報部門・研究員

研究者番号: 60373297