

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05235

研究課題名(和文)原子核中における中間子質量変化の系統的測定によるハドロン質量起源の研究

研究課題名(英文)Origin of hadron mass studied by the systematic measurement of spectral change of mesons in nuclei

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・仁科加速器科学研究センター・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) 151,880,000円

研究成果の概要(和文)：ハドロン質量起源の実験的検証をめざし、中間子の原子核中での質量変化を検出するため、J-PARCに電子陽電子対測定用のスペクトロメータを完成し、試運転に成功した。この建設に際して、GEMを用いた二種類の検出器すなわちGEM飛跡検出器とハドロンブラインド電子検出器の量産をおこない、国際協力もふくめ読出回路の開発と量産も行った。試運転により、スペクトロメータが設計性能を満たしていることが確認されたが、一方、データ収集に悪影響を与えるビームの時間的微細構造が発見された。J-PARCスタッフとの協力によるその低減と、データ収集システムの改良によってそれを克服し、物理データ収集の開始が可能になった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグス粒子のみでは説明できないハドロン(陽子、中性子等)の質量の起源についての実験的証拠を得るため、原子核中での中間子質量変化の測定実験を立案し、準備を整えた。今後J-PARCでビームタイムを得て十分な統計量を蓄積することにより、中間子の質量変化について、ハドロン物性研究のさきがけとなる世界随一のデータが得られると期待する。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the mass modification of vector mesons in nuclear matter, a spectrometer to measure the di-electron decay of the vector mesons are constructed and commissioned in J-PARC Hadron experimental facility. We developed and produced two kind of GEM detectors: GEM Tracker and Hadron blind Cherenkov detector. Read-out circuits were also developed and deployed, partly with a collaboration with CERN RD51. Design performance of the spectrometer is almost satisfied in the commissioning runs, however, unexpected beam micro structures in the time domain were found, which deteriorate significantly our data acquisition performance. The problem is solved by the improvement of beam handling by J-PARC MR and Hadron beam line groups, and also by the upgrade of our data acquisition system, thus we can start the physics data collections.

研究分野：原子核物理学

キーワード：実験核物理 放射線検出器 GEM 電子検出器 量子色力学 質量変化 有限密度

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

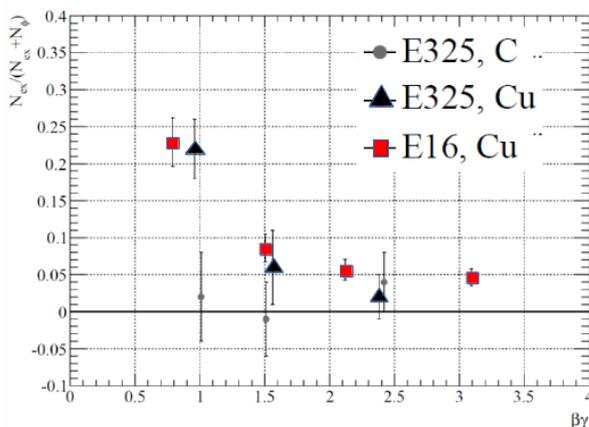
### 1. 研究開始当初の背景

陽子・中性子・中間子などハドロンの質量は、南部陽一郎らが提唱して素粒子物理学の標準的な考え方となっている「対称性の自発的破れによる質量の獲得」機構により生成されると考えられている。Higgs 機構も南部のアイデアに立脚したもので、電子やクォークの質量はこれによって生成される。一方クォークの複合粒子であるハドロンの質量ははるかに重く、陽子・中性子の場合、それを構成するクォーク質量の合計のおよそ 100 倍である。この差は、量子色力学 (QCD) の基底状態(真空)でカイラル対称性が自発的に破れていることによって生まれる動的質量として説明される。Higgs 機構は 2012 年の Higgs 粒子の発見により実験的証拠があたえられたが、陽子・中性子の質量の残りの 99%、すなわち我々の世界を構成する質量の 99% を生成する機構の実験的検証が未だなされていない。そこで、動的質量は環境によって変化することに着目し、温度や密度を変更して、いわば異なる真空におけるハドロンの物性変化を調べる、というのが本研究の基本的着想である。

### 2. 研究の目的

有限密度における中間子質量分布の変化現象、特に  $\phi$  中間子の変化の確証と、その運動量依存性の初測定が本研究の目的となる。変化現象の確立のため、原子核中で崩壊する中間子の統計を先行研究(KEK-PS E325)の 6-12 倍(15000-30000 個)程度蓄積し、中間子速度依存性や標的依存性を十分な統計に基づいて測定する。中間子が原子核中で崩壊すればそのときの質量(たとえば、軽くなった質量)が測定されるが、核外での崩壊のデータも重なってしまう。原子核中での崩壊確率は、速く動く中間子については小さく、また、サイズの大きい原子核について大きいと考えられるので、変形の大きさの速度依存性、標的核サイズ依存性を見るのが重要であるが、これは理論によらない解析が可能である(下図参照)。これで変化の存在を確立し、次に各種理論による質量分布の計算との比較をおこなう。中間子の質量変化量(通常原子核密度換算)を導出し、標的原子核によらない運動量依存性も調べる。

#### 2ヶ月(15000個)のデータ蓄積で期待される $\phi$ 中間子の変形量とエラー

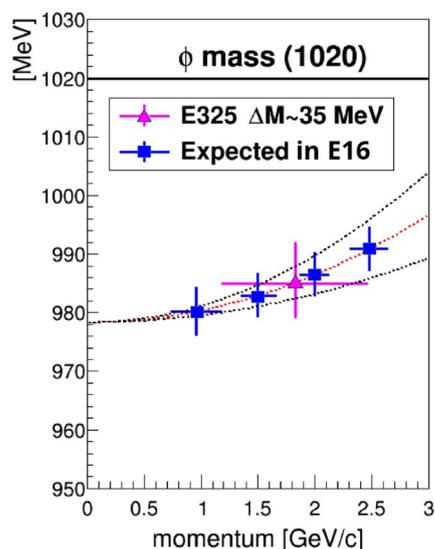


質量変化がない場合の Breit-Wigner 形からの変形成分量を  $\phi$  中間子 peak 面積との比であらわし、中間子の速度 ( $\beta_\gamma$ ) の関数として plot した。

先行研究の E325 実験では 標的 Cu ( $\blacktriangle$ ) からの最も遅い成分のみ有意に 0 から離れているが、本研究 (E16、 $\blacksquare$ ) では、どの速度成分についても有意に 0 から離れ、しかも変形量が速度に依存する(速度が速い方では変形が少ない)ことが示される。

そもそもハドロンを QCD 真空の励起あるいは準粒子として捉えた場合、有限温度/密度の媒質中では、質量分布(スペクトル関数)が変化する。つまり、ピーク位置としての質量やピークの幅が Breit-Wigner 関数形のまま変化するというだけでなく、非対称になる、ダブルピークになるなど複雑な変化が起こりうる。そしてそれが媒質の温度や密度、また粒子の運動量に依存すると

というのが一般論である。こうしたスペクトル関数の変化そのものが、QCD 真空におけるハドロンの物性なわけだが、QCD 和則の方法では、たとえばスペクトル関数の平均値(ピーク幅が小さくかつ左右対称である場合は、ピークの位置すなわちいわゆる質量と一致する)をカイラル対称性の秩序変数であるクォーク凝縮の関数として表せる。これがいわゆる有限温度/密度での mass shift である。 $\phi$  中間子についてはもともと幅が細い(4.4MeV)ため適用しやすいが、 $\rho$  中間子については幅が広い(150 MeV)ため不定性は大きい(peak の移動と幅の増大の区別がつきにくい)。そのため  $\phi$  中間子に着目し、QCD にもとづいた予言と実験データを比較する。質量の運動量依存性(分散関係)は、有限密度・有限温度環境では存在が当然視されているが、従来の実験で測定されたことはない全く新しい測定量であり、異なる真空でのハロン物性研究の第一歩となる。また、現状では多くの理論計算が運動量ゼロの中間子に対してのみおこなわれているが、実験データは中間子の運動量が有限であるため、ゼロに対して外挿して理論値と比較する、という立場もある。(下図参照)



### φ 中間子の分散関係の理論曲線と期待される実験データ

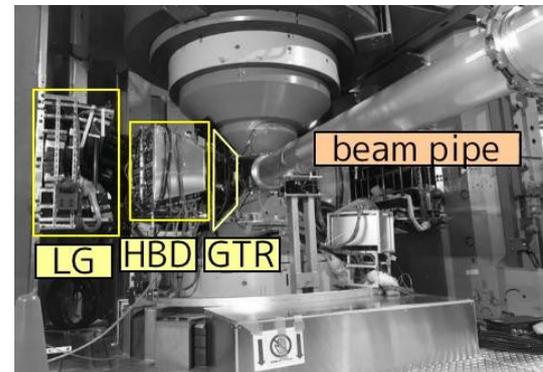
理論曲線(赤点線、黒点線はそのエラー)は[S.H.Lee, PRC57 (1998) 927]による。先行研究のE325でのφの質量と運動量とそのエラー(ピンク)、本研究で蓄積される統計(4カ月でE325の12倍)によるφの質量の運動量依存性(分散関係)とそのエラー(青)を重ねて示した。

## 3. 研究の方法

J-PARCハロン実験施設 高運動量ビームラインに電子陽電子対測定用スペクトロメータを建設し、約2ヶ月から4ヶ月の物理データ収集ビームタイムにより、KEK-PS E325 実験で得た6倍(15000個)から12倍(30000個)のφ中間子データを収集する。2007年にプロポーザルを提出した、このJ-PARC E16 実験の最終目標はE325 実験の50-100倍の統計の蓄積であるが、本研究費で建設が完了する検出器8モジュール(全体構想の約1/3)でも、2(研究の目的)に記したようなデータを収集し、E325 実験の結果の再確認をおこなうのみならず、中間子質量変化の運動量依存性(すなわち有限密度における中間子の分散関係)を初めて測定し、また、QCD和則にもとづく理論計算との比較により、原子核内のクォーク凝縮  $\langle \bar{s}s \rangle_\rho$  の実験による決定ができる。

このスペクトロメータでは、J-PARC MR 加速器からの高強度一次ビーム(30 GeV,  $1 \times 10^{10}$  protons/pulse)を、標的起源の電子バックグラウンドを抑えるため物質量を減らした極薄の原子核標的(放射長で最大0.5%、Cuで80 μm、Pbで30 μm)に照射し、 $1 \times 10^7$  Hzの反応レートに耐える検出器で大立体角をカバーする。外側にある二段の電子同定検出器(鉛ガラスカロリメータ(LG)とハロンブラインド電子検出器(HBD))の同時計測により、中間子が崩壊して生成される電子と陽電子の対をトリガーする。内側の高磁場領域にあるGEM飛跡検出器

(GTR)で電子と陽電子の飛跡を再構成し、親である中間子の質量を精度良く測定する。各検出器はモジュール化されており、部分的増備が容易な設計になっている。建設したスペクトロメータの写真と平面図を以下に載せる。

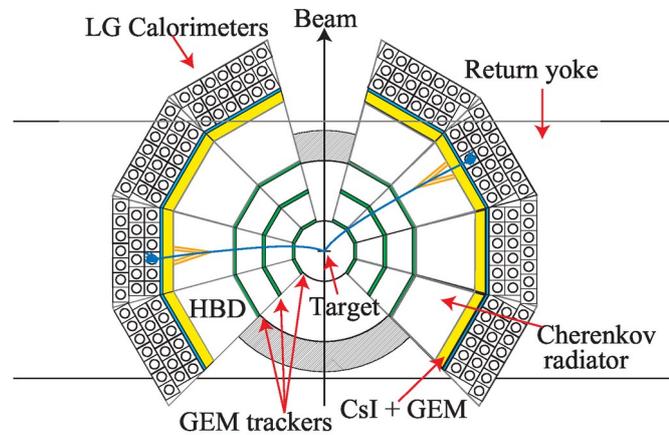


ビームライン上流左側より見る、スペクトロメータ磁石内部に設置された検出器群(上)

右側の検出器は見にくいですが、説明をつけた左側と対称な位置に同様に設置されている。

平面図(右)

建設した8モジュールに相当する。



#### 4. 研究成果

放射線/粒子検出器開発の側面では、GEM(Gas Electron Multiplier, 50 ミクロン厚のカプトンフォイル両面に5 ミクロン厚の銅電極を貼り、直径70ミクロンの穴を無数に開け、400V程度の電圧をかけてガス増幅を行う)を用いた二種類の検出器の実用化を挙げることができる。(原理実証はすでに別の研究費でおこなっており、本研究で行ったのは量産である)。

すなわち、

- GEM を 3 枚用いて増幅をおこない、X方向とY方向の二次元読出が可能で、かつ放射長で0.3%という低物質質量を実現した飛跡検出器(GEM Tracker, GTR) [\[発表論文 NIM 2024\]](#)

と

- GEM に CsI を蒸着して光電面として用いて真空紫外チェレンコフ光を検出する、かつ放射体である CF<sub>4</sub>ガスを増幅ガスとして用いることで放射体とガスを隔てる窓を省略するなど軽量かつ低物質質量を実現したハドロブラインド電子検出器(HBD) [\[発表論文 JINST, NIM 2020\]](#) は、欧州 CERN および米国 RHIC/PHENIX 実験から技術導入したものであるが、日本初の実用化である。

また、これらを読み出すための回路は CERN RD51 共同開発グループに参加して得た SRS (scalable readout system)を用いるが、トリガー信号を GEM 増幅最終段から取り出すためのプリアンプはわれわれのグループで開発し、やはりこの研究費で量産をおこなった。

上記検出器と、読出回路、トリガー信号取得回路は、J-PARC など国内原子核素粒子物理実験への応用ができる。[発表論文 IEEE 2021, 2019]

この2種類の検出器は、この研究で建設した、中間子質量の変化を測定する電子陽電子対測定用スペクトロメータのために欠かせない検出器である。

2020-21年度の検出器試運転により、スペクトロメータの設計性能がほぼ達成されていることを確認した[発表論文 *Few Body Syst., NIM2022, Acta. Phys. Polon. A, B*]。一方、ビームの時間的微細構造がデータ収集に悪影響をおよぼしていることを確認し、データ収集システムの改良を2022年にかけておこなう一方、J-PARC MR加速器グループおよびハドロンビームライングループとの協力で、微細構造対策を考案した。それらの進展をTDR(technical design report)にまとめ、2022年7月のPAC(J-PARC 実験審査委員会)において、物理データ取得への移行の審査を受けたところ、2022年度後半以降にさらなる試運転をおこなって各種対策が奏効することを実証せよ、との勧告をうけた。その試運転は、施設の事故等の影響もあって2023年6月まで延期され、さらに試運転開始後のハドロン実験施設での火災によって計画時間数のおよそ10%(21時間)で中断するなどの不運にみまわれたものの、その限られたビームタイムの中で、微細構造の一部解消とデータ収集システムの性能向上を確認することに成功した。

2023年度からは、2027年度までの基盤S「中間子の電子対崩壊精密測定による原子核中のカイラル凝縮の研究」を獲得した。2024年4月に予定されている再度の試運転を経て、24年度後半から25年度にかけていよいよ物理データ収集に臨む。

付記: 本報告書作成時点までに上述の試運転は成功し、物理データ収集トリガーについてのデータ収集システムの性能が十分であることは確認された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 T.N. Murakami et al.	4. 巻 1058
2. 論文標題 Construction of gas electron multiplier tracker for the J-PARC E16 experiment	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 168817 ~ 168817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.168817	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. Aoki et al.	4. 巻 64
2. 論文標題 Experimental Study of In-medium Spectral Change of Vector Mesons at J-PARC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 63:1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-023-01828-7	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 該当する

1. 著者名 K. Kanno et al.	4. 巻 18
2. 論文標題 Commissioning of a hadron blind detector for dielectron measurement in pA reactions at J-PARC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C06021 ~ C06021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/06/C06021	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 S. Nakasuga 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 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167335 ~ 167335
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 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 Physica Polonica 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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Ichikawa 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 Physica Polonica B Proceedings Supplement	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/aphyspolbsupp.16.1-a143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahashi Tomonori 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 Transactions on Nuclear Science	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

1. 著者名 I. Tserruya, K. Aoki, C. Woody	4. 巻 970
2. 論文標題 Hadron blind Cherenkov counters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A	6. 最初と最後の頁 163765
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.163765	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 Ashikaga Sakiko et.al.	4. 巻 26
2. 論文標題 Measurement of Vector Meson Mass in Nuclear Matter at J-PARC	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.024005	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 Ichikawa M., Takahashi T. N., Aoki K., Ashikaga S., Hamada E., Honda R., Igarashi Y., Ikeno M., Kawama D., Naruki M., Ozawa K., Sendai H., Suzuki K. N., Tanaka M., Uchida T., Yokkaichi S.	4. 巻 66
2. 論文標題 Trigger Merging Module for the J-PARC E16 Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 2022 ~ 2027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNS.2019.2928561	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 -

[学会発表] 計46件(うち招待講演 18件/うち国際学会 22件)

1. 発表者名 K.Ozawa
2. 発表標題 Mass modifications of vector mesons in a finite density matter
3. 学会等名 4th Jagiellonian symposium on Advances in Particle Physics and Medicine (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Aoki
2. 発表標題 Experimental study of in-medium spectral change of vector mesons at J-PARC
3. 学会等名 Reimei Workshop: Polarization phenomena and Lorentz symmetry violation in dense matter 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Yokkaichi
2. 発表標題 Measurements of spectral change of vector mesons in nuclear matter at finite density
3. 学会等名 Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Kanno
2. 発表標題 Study of spectral change of vector mesons in nuclear medium at J-PARC
3. 学会等名 2nd International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S.Yokkaichi
2. 発表標題 J-PARC E16 has started --spectral change of vector mesons in nuclei--
3. 学会等名 Reimei Workshop "Hadrons in dense matter at J-PARC" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kanno
2. 発表標題 Experimental study of spectral change of vector mesons in nuclear medium at J-PARC
3. 学会等名 Hadrons in nucleus 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. N. Takahashi
2. 発表標題 Data acquisition system in Run0 of the J-PARC E16 experiment
3. 学会等名 RT2020 (22nd IEEE Real Time Conference) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. N. Murakami
2. 発表標題 Construction of GEM Tracker for the J-PARC E16 experiment
3. 学会等名 SNP School 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Ozawa
2. 発表標題 Primary beam experiments at J-PARC
3. 学会等名 ANPhA Symposium 2019 "High-energy heavy ion studies in Asia/Pacific and world in coming 10 years" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Yokkaichi
2. 発表標題 Measurement of the spectral change of Vector mesons in nuclei at the high-momentum beam line in J-PARC HEF
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Aoki
2. 発表標題 E16 experiment at J-PARC
3. 学会等名 A Workshop on Heavy Flavor and Dilepton Production in Relativistic Heavy-Ion Collisions(HeFe2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Aoki
2. 発表標題 Experimental investigation on in-medium spectral change of vector mesons at J-PARC
3. 学会等名 Hadron structure and interaction in dense matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

J-PARC E16 Experiment <a href="https://ribf.riken.jp/~yokkaich/E16/E16-index.html">https://ribf.riken.jp/~yokkaich/E16/E16-index.html</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	成木 恵  (Naruki Megumi)  (00415259)	京都大学・理学研究科・教授    (14301)	

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	森野 雄平  (Morino Yuhei)  (50715240)	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    (82118)	

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			
スイス	CERN			
台湾	Academia Sinica			