

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成28年 6月8日現在

機関番号： 14301
研究種目：特別推進研究
研究期間：2011～2015
課題番号：23000003
研究課題名（和文） マルチ・ストレンジネス多体系の精密分光
研究課題名（英文） High-resolution Spectroscopy of
Many-Body systems with Multi-Strangeness
研究代表者
永江 知文 (NAGAE, Tomofumi) 京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50198298
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）： 344,800,000円

研究成果の概要（和文）：ストレンジネス量子数-2をもっているグザイ粒子が原子核に束縛された $^{12}_{\Xi}\text{Be}$ と呼ばれる新しいハイパー核を生成することに成功した。この実験は、大強度陽子加速器J-PARCのK中間子ビームラインにおいて、既存のSKSスペクトロメーターを利用して測定したものである。得られたグザイ・ハイパー核の束縛エネルギーは、これまで考えられていたより大きく、グザイ粒子と核子との間の相互作用が強い引力であることを示唆している。これと並行して、SKSより3倍程度良いエネルギー分解能を備えているS-2Sスペクトロメーターを開発・製作した。

研究成果の概要（英文）：A new type of hypernucleus with strangeness -2, $^{12}_{\Xi}\text{Be}$, which is a bound state of a Ξ in a nucleus, was successfully observed in the (K, K^+) reaction. The experiment was performed at a kaon beam line in J-PARC by using an existing magnetic spectrometer called "SKS". The obtained binding energy of the Ξ hypernucleus is larger than the values previously reported. It suggests that the Ξ -N interaction is strongly attractive. In addition, a magnetic spectrometer system called "S-2S", which has about three times better energy resolution than the SKS, has been newly constructed.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：
実験核物理、ストレンジネス、ハイパー核、グザイ・ハイパー核、J-PARC

1. 研究開始当初の背景

(1) ストレンジネス(S)が入ったバリオン多体系としてのハイパー核の研究は、これまで $S=1$ のラムダ(Λ)・ハイパー核とシグマ(Σ)・ハイパー核を中心に研究が行われてきた。一方、これを進めてストレンジネスが2個入った、マルチ・ストレンジネスのバリオン多体系の研究では、2個のラムダ粒子が束縛した二重ラムダ($\Lambda\Lambda$)・ハイパー核が数個見つかったのみであった。 $S=2$ のバリオン多体系には、この二重ラムダ・ハイパー核から約 28 MeV だけエネルギーの高い状態として、 $S=2$ のバリオンであるグザイ(Ξ)粒子が原子核に束縛したグザイ・ハイパー核が存在すると予想されている。本研究は、このグザイ・ハイパー核分光を、世界で初めて高エネルギー分解能で本格的に研究するものである。

(2) これらの相互作用の情報は、バリオン八重項にまで拡張された一般化された核力を理解する上で、最後の決定的な鍵を与える情報となることが期待される。これまでのハイパー核分光によって明らかになってきたラムダ粒子やシグマ粒子の相互作用の情報に加えて、 $S=2$ の系のバリオン間相互作用の情報は、バリオン間相互作用のモデルの構築に大きな制限を与えるものである。この観点では、最近になって我が国の研究者らが、格子量子色力学(QCD)計算の手法により QCD に基づいてバリオン間相互作用ポテンシャルを導出することに成功し、ハイペロンへも既に応用されている。この方面での計算科学の進歩は目覚ましく、近い将来、実験との直接比較ができることになると期待される。

(3) 一方、中性子星の中心部で実現されていると考えられる、通常の原子核平均密度の 5~7 倍程度の超高密度核物質においては、ストレンジネス自由度が重要な役割を果たしていると考えられている。ハイペロン自由度で考えると、最も軽いラムダ粒子は、核物質中で 30 MeV 程度の引力を感じて、核密度の 2 倍程度の中性子星内部で出現していると予想されている。負電荷のハイペロンは、高密度核物質中で高いエネルギーを持つ電子のエネルギーを受け取って出現することができる。そのため、最も軽い負電荷ハイペロンである Σ^- 粒子が存在し易いのではないかと考えられていたが、強い斥力ポテンシャルを感じる事が判明したため、この実現はあり得ないこととなった。代わりに注目されているのが、その次に軽い負電荷の Ξ^- 粒子である。本研究により、核物質中でグザイ粒子の感じるポテンシャルの強さが分かれば、どの程度の密度からグザイ粒子が中性子星中に出現しているのかを定量的に推定することが可能となる。最近発見された太陽質量の 2 倍の質量をもつ中性子星の存在は、これを構成する高密度核物質の状態方程式に強い制限を与えることとなっている。この現状は、まだまだ我々の高密度核物質に関する知見が不十分であること

を示すものであり、マルチ・ストレンジネス核物質の性質がどうなっているのかを本研究により解明することが急務となっている。

2. 研究の目的

(1) (K^-, K^+)反応を用いて、直接的にグザイ・ハイパー核を励起し、その束縛状態の存否を対応するピーク構造を観測することにより確定することを第一の目的とする。これまでの測定例では、束縛エネルギー領域に有意な事象が観測されたものの、エネルギー分解能の不足のためにピーク構造を観測できなかった。本研究では、エネルギー分解能を大幅に改善することによりこれを可能とする。ピーク位置の情報が、グザイ・ハイパー核の束縛エネルギーを与え、そのピークの幅の情報がグザイ・ハイパー核と二重ラムダ・ハイパー核との結合の強さの情報を与える。

(2) このために、新たに大立体角と高運動量分解能をもつ K^+ 中間子用の磁気スペクトロメーター系“S-2S”を建設する。2台の大口徑四重極電磁石と1台の大型偏向電磁石から構成され、中心運動量 1.37 GeV/c において約 60 msr の立体角をもち、 5×10^{-4} の運動量分解能を持っている。

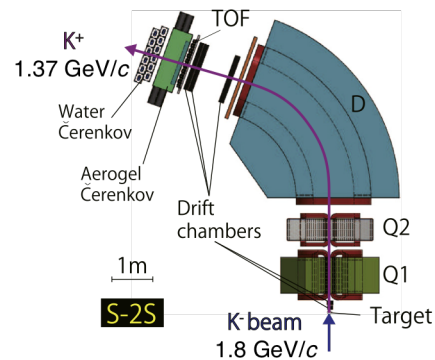


図1 S-2S スペクトロメーターの概略図。1台の偏向磁石(D)と2台の収束用磁石(Q1,2)よりなる。

(3) また、(K^-, K^+)反応では、同じ励起エネルギースペクトルに二重ラムダ・ハイパー核の励起状態も同時に励起されることが理論的に予想されている。これは、グザイ・ハイパー核として励起された状態が $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ の結合によって励起されるものである。それぞれのハイパー核のエネルギー準位は、 $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ の結合の強さに応じてエネルギーが変化することが期待される。すなわち、定性的には、 $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ の結合が強いとグザイ・ハイパー核準位の幅が広がり、二重ラムダ・ハイパー核が強く励起されるという傾向になる。このように $S=2$ のバリオン多体系全体の励起スペクトルを実験的に測定することにより、グザイ粒子と核子の相互作用、ラムダ粒子とラムダ粒子の相互作用、 $\Xi N - \Lambda\Lambda$ の結合、というそれぞれの相互作用の情報を引き出すことが可

能となる。

3. 研究の方法

(1) 大強度陽子加速器施設 J-PARC において得られる中間エネルギーの大強度 K 中間子ビームと大立体角を有し高いエネルギー分解能を持つ磁気スペクトロメーターを組み合わせることにより、世界で初めて(K, K⁺)反応によるグザイ・ハイパー核と二重ラムダ・ハイパー核の分光学的研究を行う。J-PARC の K1.8 ビームラインでは、ビームスピルあたり 100kHz 台の K ビーム強度が得られている。ビーム粒子質量の選別用に 2 台の静電分離装置が設置され、ビーム中の K/π 比を向上させるという工夫がなされている。既存の磁気スペクトロメーター“SKS” (運動量分解能 $\Delta p/p=1.7 \times 10^{-3}$ (FWHM)) を利用し、実験標的には ¹²C を用いて ¹²_gBe ハイパー核の束縛状態をピークとして観測する。また、ポリエチレン(CH₂)標的を用いて、素過程反応である Kp → K⁺Ξ⁻ 反応の生成断面積の入射運動量依存性を測定する。

(2) これと並行して、より運動量分解能を向上させた大立体角の磁気スペクトロメーター“S-2S”を製作する。エネルギー分解能が更に向上することにより、グザイ・ハイパー核の束縛状態の幅の測定が可能となる。また、ΞN → ΛΛ の結合の強さに応じてエネルギーが変化すると期待されているグザイ・ハイパー核束縛状態のエネルギーと二重ラムダ・ハイパー核エネルギー準位を精密測定することにより、これを観測する。

4. 研究成果

(1) SKS を用いた Ξ 粒子の生成：実験標的として CH₂ 標的に含まれる陽子を使用して、素過程反応である p(K⁺, K⁺)Ξ⁻ 反応の断面積を従来より 50 倍以上良い統計精度と 3 倍程度良いエネルギー分解能で測定した (図 2 参照)。Ξ 粒子の測定生成量は 1 日当たり 6000 事象であり、エネルギー分解能も合わせて既にこれまでの世界最高レベルにある。入射運動量に対する生成断面積の依存性を 1.5~1.9 GeV/c の間で測定した結果、1.8 GeV/c におい

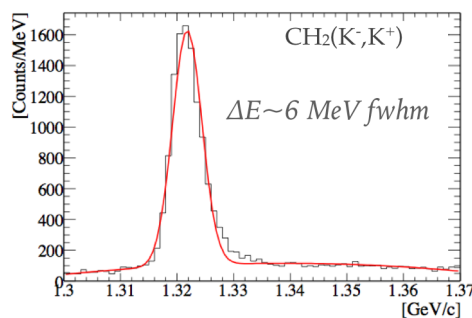


図 2 Ξ 粒子生成スペクトル。

て最大の断面積をもつことが高統計精度で初めて確認された。これらの高統計データは、炭素標的によるグザイ・ハイパー核スペクトル

ルの理論解析の基礎情報として非常に貴重な情報を与えるものである。

(2) SKS を用いたグザイ・ハイパー核の生成：炭素 ¹²C 標的を用いて ¹²C(K⁺, K⁺)反応によりグザイ・ハイパー核を生成することに成功した (図 3)。図の束縛エネルギーが 0 MeV の縦の破線が、束縛閾値を示しており、その左側に

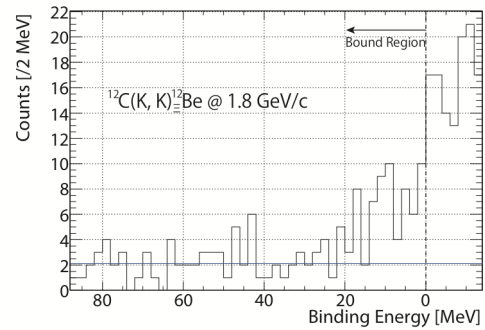


図 3 ¹²C(K, K⁺)反応の励起エネルギースペクトル。

ある構造が、グザイ・ハイパー核準位に相当する。全部で 8×10^{10} 個の入射運動量 1.8 GeV/c をもった K ビームを入射し、約 60,000 事象の非束縛グザイ粒子生成事象を観測した。束縛領域にはフラットなバックグラウンド事象が存在しているが、これを統計的に有意に上回るグザイ・ハイパー核信号事象が観測された。データ解析は進行中であるが、束縛エネルギーが約 10 MeV 辺りに観測されているピーク構造は統計的に有意とみなせるものである。この解釈が正しいとするとグザイ粒子と原子核との相互作用は、従来考えられてきたより強い引力であることを意味している。この結果については、2016 年 3 月の日本物理学会で報告を行った。

(3) S-2S スペクトロメーターの建設：S-2S スペクトロメーターは 2 台の四重極電磁石と 1 台の偏向電磁石からなる磁気光学系と、飛跡検出器と粒子識別トリガー検出器系から成り

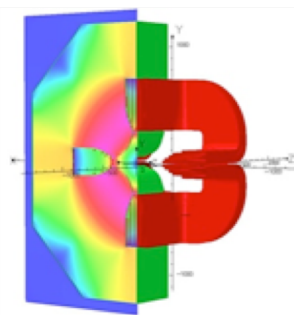


図 4 四重極電磁石 Q1 の 3 次元磁場解析結果。

立っている。全ての大型電磁石は完成し、励磁試験を行ったのち磁場分布の解析を進めている。図 4 はその例であり、0.002T の精度で

磁場分布を再現できることが判明した。この磁場分布は設計通りの収束能力に対応しており、十分な立体角を保証するものとなっている。

トリガー検出器では、信号となる K^+ 中間子にくらべて約 20 倍多いバックグラウンド事象からくる陽子を抑制する必要がある。このために水チェレンコフ検出器を開発・製作した。量子効率の高い光電面からなる光電子増倍管を用いることにより、目標性能とした 90% 以上の陽子トリガー除去率を達成できることが判明した。また、入射位置や角度に対する依存性も小さいことが分かった。加えて、出来上がった実機に対して、磁石からの漏れ磁場の効果を試験し、これをアクティブに打ち消すように小さなコイルを光電子増倍管に巻き付けることにより補償する方式を確立した。粒子識別のためには、飛行時間測定のためのプラスチック・シンチレーション検出器を製作した。個別の時間分解能として 100 psec であることを確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① T. Gogami, N. Amano, S. Kanatsuki, T. Nagae, K. Takenaka, Development of water Cerenkov detector for on-line proton rejection in Ξ^- hypernuclear spectroscopy via the (K, K^+) reaction, Nucl. Instr. Meth. A, 査読有, 2016, 70-84. 10.1016/j.nima.2016.02.021
 - ② S. Kanatsuki, N. Amano, H. Ekawa, H. Fujioka, E. Hirose, Y. Ichikawa, S. Kato, M. Moritsu, T. Nagae, H. Takahashi, T. Takahashi, K. Takenaka, Spectroscopic Study of $S=-2$ Hypernuclei with a New Spectrometer S-2S, JPS Conf. Proc. 8, 021018 (2015) (6pages), 10.7566/JPSCP.8.021018
 - ③ Y. Ichikawa, T. Nagae(2 番目), H. Fujioka(3 番目), T. Takahashi(34 番目), 他 40 名, Observation of the " K_{pp} "-like structure in the $d(\pi^+, K^+)$ reaction at 1.69 GeV/c, PTEP, 査読有, 2015, 021D01 10.1093/ptep/ptv002
 - ④ A. Feliciello and T. Nagae, Experimental review of hypernuclear physics: recent achievements and future perspectives, Rep. Prog. Phys., 査読有, 115 巻, 2015, 096301. 10.1088/0034-4885/78/9/096301
 - ⑤ M. Agnello, T. Nagae(26 番目), H. Fujioka(19 番目), 他 31 名, $\Sigma^- p$ emission rates in K^- absorptions at rest on ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{13}\text{C}$, and ${}^{16}\text{O}$, Phys. Rev. C, 査読有, 92 巻, 2015, 045204 10.1103/PhysRevC.92.045204
 - ⑥ Y. Ichikawa, T. Nagae(2 番目), H. Fujioka(8 番目), T. Takahashi(34 番目), 他 40 名, Inclusive spectrum of the $d(\pi^+, K^+)$ reaction at 1.69 GeV/c, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, 10 巻, 2014, 101D03 10.1093/ptep/ptul28
 - ⑦ Tomofumi Nagae, Strangeness Nuclear Physics at J-PARC, Few Body Systems, 査読有, 54 巻, 2013, 785-790 10.1007/s00601-012-0553-5
 - ⑧ Tomofumi Nagae, Concluding remarks, Nuclear Physics A, 査読有, 914 巻, 2013, 559-567 10.1016/j.nuclphysa.2013.02.001
 - ⑨ T. Takahashi, H. Fujioka(13 番目), E. Hirose(15 番目), T. Nagae(42 番目), H. Takahashi(59 番目), 他 70 名, Beam and SKS spectrometers at the K1.8 beamline, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有, 2012 巻, 02B010 (16pages), 10.1093/ptep/pts023
 - ⑩ Tomofumi Nagae, Experimental searches for antikaonic clusters, Nucl. Phys. A, 査読有, 881 巻, 2012, 141-149, 10.1016/j.nuclphysa.2011.12.003
 - ⑪ Tomofumi Nagae, Hadron physics at J-PARC, Hyperfine Interac., 査読有, 211, 2012, 1-7, 10.1007/s10751-011-0501-7
 - ⑫ Tomofumi Nagae, Strangeness in nuclear physics, J. Phys. Conf. Ser., 査読無, 312, 2011, 022001 (9pages) 10.1088/1742-6596/312/2/022001
- [学会発表] (計 31 件)
- ① 金築俊輔、 (K^-, K^+) 反応を用いた Ξ ハイパー核分光実験 J-PARC E05 の pilot run、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学和泉キャンパス (宮城県・仙台市)
 - ② Tomofumi Nagae, Overview of Hypernuclear Physics, LEAP2016, 2016 年 3 月 7 日、金沢歌劇座 (石川県・金沢市)
 - ③ Toshiyuki Gogami, Hiroyuki Fujioka(10 番目), Erina Hirose(16 番目), Tomofumi Nagae(32 番目), Hitoshi Takahashi(43 番目), Toshiyuki Takahashi(44 番目) 他 43 名, Spectroscopy of nuclei with multi-strangeness using new S-2S spectrometer at J-PARC, LEAP2016, 2016 年 3 月 7 日、金沢歌劇座 (石川県・

- 金沢市)
- ④ Tomofumi Nagae, Overview of Strangeness Nuclear Physics, QUCS2015, 2015年11月4日~8日、奈良国際フォーラム(奈良県・奈良市)
- ⑤ 後神利志、金築俊輔、永江知文、(K, K^+)反応によるグザイ原子核分光測定に用いる陽子除去用水チェレンコフ検出器の開発、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月26日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪市・住吉区)
- ⑥ 金築俊輔、市川裕大、江川弘行、後神利志、永江知文、(K, K^+)反応を用いた Ξ ハイパー核分光実験におけるバックグラウンドの評価、日本物理学会2015年秋季大会、2015年9月26日、大阪市立大学杉本キャンパス(大阪市・住吉区)
- ⑦ Tomofumi Nagae, Status of K^+pp search experiments, HYP2015, 2015年9月8日、東北大学(宮城県・仙台市)
- ⑧ Tomofumi Nagae, Hadron Physics at J-PARC, Quark Nuclear Physics 2015, 2015年3月3日、バルパライソ(チリ共和国)
- ⑨ Tomofumi Nagae, Experiments on Strangeness nuclear physics at J-PARC, Progress on J-PPARC Hadron Physics, 2014年11月30日、茨城量子ビームセンター(茨城・東海)
- ⑩ K. Takenaka, Development of a water Cherenkov counter for the spectroscopy of Ξ hypernucleus, 日米物理学会 合同核物理分科会, 2014年10月8日、ハワイ島(アメリカ合衆国)
- ⑪ S. Kanatsuki, Spectroscopy of $S=-2$ hypernuclei at J-PARC with a new spectrometer S-2S, 日米物理学会 合同核物理分科会, 2014年10月9日、ハワイ島(アメリカ合衆国)
- ⑫ Tomofumi Nagae, Hypernuclear experiments at J-PARC, The 26th Indian Summer School, 2014年9月4日、プラハ(チェコ共和国)
- ⑬ S. Kanatsuki, Design and status of a new spectrometer S-2S for spectroscopy of $S=-2$ hypernuclei, The 26th Indian Summer School, 2014年9月4日、プラハ(チェコ共和国)
- ⑭ S. Kanatsuki, Spectroscopic Study of $S=-2$ Hypernuclei with a New Spectrometer S-2S, 2nd international symposium on science at J-PARC, 2014年7月14日、(茨城県・つくば)
- ⑮ Tomofumi Nagae, K^+pp search experiments at J-PARC, MESON 2014, 2014年5月31日、クラコフ(ポーランド)
- ⑯ 天野宣昭、J-PARC E05 実験で用いる水チェレンコフ検出器の開発、日本物理学会第69回年次大会、2014年3月28日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
- ⑰ T. Nagae, Experimental overview of Strangeness Nuclear Physics, SNP2013, 2013年12月13日、Xiamen(中国)
- ⑱ T. Nagae, Hadrons in Hypernuclei, HADRON2013, 2013年11月6日、奈良県新公会堂(奈良県・奈良市)
- ⑲ T. Nagae, Strangeness program on light hadronic systems at J-PARC, IIAS-ISF Workshop, 2013年10月8日、Jerusalem(イスラエル)
- ⑳ T. Nagae, $S=-2$ hypernuclei physics at J-PARC, NUFRA2013, 2013年10月4日、Antalya(トルコ)
- ㉑ 金築俊輔、J-PARC での分光実験に用いる(K, K^+)反応用高分子能磁気スペクトロメーターS-2Sの設計、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月26日、広島大学東広島キャンパス(広島県・東広島市)
- ㉒ T. Nagae, J-PARC Hadron Facility and Strangeness Nuclear Physics, 第7回日伊原子核シンポジウム、2012年11月21日、ミラノ(イタリア)
- ㉓ 金築俊輔、J-PARC K1.8 ビームラインで用いる新規スペクトロメーターS-2Sの準備状況、日本物理学会2013秋季大会、2013年9月21日、高知大学(高知県・高知市)
- ㉔ T. Nagae, Strangeness nuclear physics program at J-PARC, 第8回日中原子核シンポジウム、2012年10月15日、北京(中国)
- ㉕ T. Nagae, Concluding remarks, HYP2012 Conference, 2012年10月5日、バルセロナ(スペイン)
- ㉖ S. Kanatsuki, Design of a new spectrometer S-2S for Ξ -hypernuclear spectroscopy at J-PARC, HYP2012 Conference, 2012年10月3日、バルセロナ(スペイン)
- ㉗ 金築俊輔、J-PARCにおけるマルチ・ストレンジネス多体系の分光実験に用いる高分解能磁気スペクトロメーターの設計、日本物理学会2012秋季大会、2012年9月11日、京都産業大学(京都府・京都市)
- ㉘ T. Nagae, Strangeness nuclear physics at J-PARC, The 20th Few Body Conference, 2012年8月20日、福岡国際会議場(福岡県・福岡市)
- ㉙ T. Nagae, Recent topics in Hypernuclear physics and Perspective at J-PARC, HHI2012 International Workshop, 2012年2月29日、ニューヨーク州(アメリカ合衆国)
- ㉚ T. Nagae, Experimental searches for antikaonic clusters, ECT*

International Workshop、2011年9月
26日、トレント（イタリア）

- ③1 森津学、J-PARCにおけるEハイパー核分
光実験の実験計画(2)、日本物理学会秋季
大会、2011年9月17日、弘前大学文京
町キャンパス（青森県・弘前市）

〔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〕

アウトリーチ活動情報

- 永江知文、「クォーク多体系の世界を探る」、京都大学物理学宇宙物理学専攻ローレンツ祭特別講義、2012年6月15日、京都大学。
- 永江知文、「クォークの世界を探る」、GCOE市民講座、2012年10月14日、京都大学。
- 永江知文、「クォーク多体系の世界を探る」、高校生向け ELCAS プログラム講演、2012年2月2日、京都大学。

ホームページ情報

[http://www-nh.scphys.kyoto-](http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/~nagae/tokubetsu/index.html)

[u.ac.jp/~nagae/tokubetsu/index.html](http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/~nagae/tokubetsu/index.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永江知文 (NAGAE, Tomofumi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号： 50198298

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

高橋 俊行 (TAKAHASHI, Toshiyuki)

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： 50281960

藤岡 宏之 (FUJIOKA, Hiroyuki)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号： 30513395

高橋 仁 (TAKAHASHI, Hitoshi)

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： 603533372

広瀬 恵理奈 (HIROSE, Erina)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師

研究者番号： 90391763

(4) 研究協力者

加藤 静吾 (KATO, Seigo)

山形大学・理学部・名誉教授