

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23224006

研究課題名(和文) エマルションによる大統計ダブルハイパー核生成実験

研究課題名(英文) Systematic Study of Double-Hypernuclei with Nuclear Emulsion

研究代表者

仲澤 和馬 (nakazawa, kazuma)

岐阜大学・教育学部・教授

研究者番号：60198059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 151,600,000円

研究成果の概要(和文)：原子核乾板中のグザイ粒子追跡の全自動化に成功し、従来の数百倍速のダブルハイパー核全面探査システムを構築した。その結果、過去の実験の乾板内に世界初のグザイハイパー核(木曾イベントと命名)の検出に成功し、グザイと核との間に引力的な核力が働くことを突き止めた。

J-PARC実験(E07)では、2.1tの乳剤を乾板にして神岡鉱山内に保管し、半導体飛跡検出器、X線検出器(Hyperball-X)やビームライン上の検出器の駆動に成功した。平成28年度に最優先でビーム照射実験が可能となった。理論では、ラムダ-ラムダ相互作用のp-waveの斥力効果が、中性子星の最大質量に大きく影響を及ぼすことを指摘した。

研究成果の概要(英文)：Fully automated systems were successfully built for following Xi- particles and for whole-area scanning to detect double-hypernuclei in nuclear emulsion with speed in several hundreds' faster than the past one. The later system gave us an evidence for the presence of Xi-hypernucleus (named KISO Event), for the first time in the world, in the emulsion of the previous experiment, and then we found that an attractive nuclear-force would play between Xi- particle and nucleus.

In preparation of the E07 experiment at J-PARC, we made emulsion plates of 2.1 ton Gel and stocked them in the KAMIOKA mine, and it was achieved for driving solid-state tracking detector, X-ray detector (Hyperball-X) and detectors along the beam line. Therefore our experiment is recommended to run beam exposure in 2016 with the top priority. In theoretical research, it was pointed out that repulsive-force effect of p-wave on the Lambda-Lambda interaction had a great influence on the maximum mass of the neutron star.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核(実験) ダブルハイパー核 エマルション 全面スキャン SSD 少数多体計算

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子核物理学分野での最重要課題の一つは、ハイペロン-ハイペロン間相互作用の決定であり、この決定のための唯一無二の手段は、ハイペロン2つを原子核に加えたダブルハイパー核の構造研究である。

(2) その核構造研究のためのダブルハイパー核(ストレンジ量子数 $s = -2$ の原子核)生成実験の最強の方法は、申請者らが開発した(原子核乾板を用いた)エマルジョン実験である。

(3) 申請者らが世界で初めて不定性なく同定した新種のダブルラムダハイパー核では、50年来の予想を大きく覆し、ラムダ粒子間相互作用(s 波)の引力が非常に弱い(約1/4程度)ことが判明し、新しい相互作用モデルの構築や中性子星内部の研究を進展させた。

(4) ハイペロン間相互作用における p 波やスピン依存力などの更なる解明が切望され、それにはより多くのダブルハイパー核を生成・検出し、その質量計測が必要不可欠であった。

2. 研究の目的

原子核物理学における緊急かつ最重要課題の一つである、ハドロン間の相互作用を解明し、ストレンジネス核物理研究の発展に大きく貢献する。具体的には、従来(検出数9例)の100倍を超えるダブルハイパー核を生成させ発見し、それらの崩壊の解析による質量計測と精密理論計算との比較・検討から、ハドロン間の相互作用を解明する。唯一無二の手段である独自のエマルジョン実験手法を有する代表者と、理論解析に熟練した研究分担者との強力なタイアップにより、世界に先駆けての達成を目指す。

3. 研究の方法

(1) J-PARC の高強度で従来の約4倍高純度な K^- ビームを、従来の約3倍の原子核乾板に照射し、 $p(K^-, K^+)Xi^-$ の K^+ でタグした Xi^- 粒子候補を、SSD で位置・角度を高精度に決定し乾板中で高速に追跡(「複合実験法」)して、過去の約10倍のダブルハイパー核を検出し質量を測定する、E07 実験を遂行する。

(2) K^+ 粒子でタグできる効率は、スペクトロメータやカウンター系の覆う立体角の制限、および K^+ 粒子再構成の成功率などから、生成される Xi^- 粒子の10%程度である。そこで、ダブルハイパー核の生成・崩壊に特有な3つの分岐点を持つ事象を、 K^+ に依存せず乾板の全面探査で、従来の100倍を超えるダブルハイパー核を発見しそれらの質量を測定する。

(3) 以上を遂行するための、高速追跡・探査システムを立ち上げる。

(4) 上記実験データに、理論家との協力で「無限小変位ガウス・ロープ法」という独創的な少数多体系計算法を適用し、ダブルハイパー核のスピン・パリティの決定とともに、ラムダ-ラムダ間相互作用を解明する。

4. 研究成果

採択直前の東日本大震災で、ビーム照射が当初予定(平成24年度)より1年程度遅延することは大きな問題とならなかったが、平成25年の乳剤発注から2週間後におきたJ-PARC ハドロンホール放射能漏えい事故の復旧には2年を要し、計画期間(平成23~27年度)内にビーム照射を実施できなかった。しかし、以下のような成果を得て、平成28年度の最優先課題として6月にビーム照射を実施できることとなった。

(1) ダブルハイパー核実験棟の竣工

本科研費採択(平成23年度)直後から、岐阜大学がダブルハイパー核実験専用の実験棟の設計に入り、平成24年5月に竣工した。実験棟を下記図1に示す。実験棟は、前室、塗布室、乾燥室、現像室からなり、総床面積100 m^2 で乾板取扱い施設としては世界最大規模となる。



図1. 岐阜大学教育学部ダブルハイパー核実験棟および倉庫。

(2) 大量乾板の製作

上記実験棟において、平成25年12月から平成26年5月にかけて、乾板を作成した。

ここでは、

乾板の支持体としての大型放電加工装置を用いた幅1mで透明な40 μm 厚の ps -film の「濡れ」向上、

乾板の硬度調整のための試薬の選別と滴下量の最適化、

大型乾板作成治具および作成手法、

現像後の銀析出の抑制手法、

などの、これまでに経験のない規模での技術開発や性能向上に成功した。

2.1 t の原子核乳剤を乾板にした。総数は、大きさが 345×350 mm^2 の断面を持ち膜厚0.95 mm と0.2 mm のものが、それぞれ1360枚および220枚で、ニュートリノ振動実験CHORUSに匹敵するものとなった。

(3) 乾板の保管

乳剤を乾板にすると荷電粒子を記録し始める。実験に無関係な荷電粒子は、観察時の顕微鏡画像のコントラストを落とし、ダブルハイパー核探査のスピードを低下させる。荷電粒子被ばくの主因は、宇宙線と大気中の線によるコンプトン電子であるので、東京大学宇宙線研究所神岡地下実験施設にて、鉛ブロック内にビーム照射の直前まで保管させていただくことにした。その結果、図2および図3に示すように、宇宙線とコンプトン電子は、地上の冷蔵庫内保管に比して、それぞれ1/7および1/5に抑えることができた。この場を借りて、宇宙線研究所に深く感謝するものです。

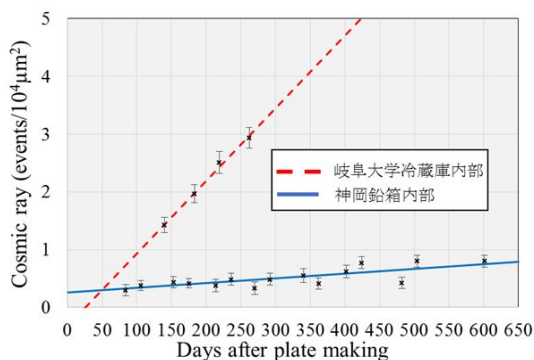


図2. 作成後の日数と宇宙線による単位面積当たりの被ばく量の関係。大学の冷蔵庫内(破線)および神岡地下保管(実線)の乾板。

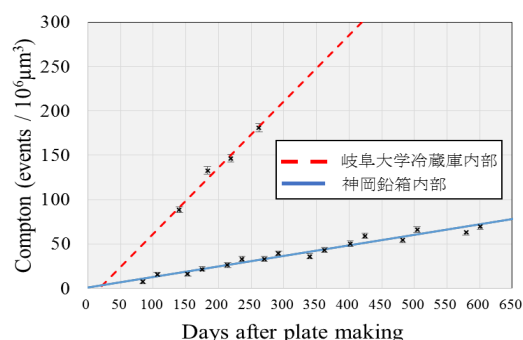


図3. 作成後の日数とコンプトン電子による単位体積当たりの被ばく量の関係。大学の冷蔵庫内(破線)および神岡地下保管(実線)の乾板。

(4) 半導体検出器(SSD)の開発および乾板との位置較正

当初開発を目指した両面半導体(DSSD)は、センサーの均一性不足、ワイヤーボンディングの不成功で断念し、実績のある片面半導体(SSD)に変更して、乾板上流に(x1, y1, x2, y2)と下流に(x3, y3, x4, y4)と、それぞれ4枚を用意した。E07では加速器ビームをエマルションスタックの全面に照射するようエマルションムーバーと呼ばれる架台(精度 10 μ m)にエマルションスタックを取り付け、SSDと乾板の間に反陽子ビームを貫通させ、ムーバー座標系、SSD座標系とエマルション座標系の位置較正をスタック毎に行う。ビーム飛跡のスキャンプログラム、パターンマッチのアルゴリズムを開発し、2015年10月にJ-PARCのビームテスト照射で作成した乾板

を用いて、手法の有効性(かつてのE373実験相当の精度である約20 μ m)を示した。

(5) グザイ粒子飛跡の自動追跡の開発

探査に数年を要したかつてのE373実験の10倍のグザイ粒子飛跡の追跡には、その全自動化が不可欠である。それには乾板中の飛跡の自動認識と、乾板どうしの数 μ m程度の高精度な位置較正が不可欠である。

低コントラストでノイズ飛跡が大量に記録された画像でも、対象となる飛跡を認識する画像処理を開発し、1枚の厚型乾板の上表面から下表面まで飛跡を追跡する成功率は、現在80.3 $^{+4.3}_{-4.8}$ %である。図4は追跡成功率の角度依存性である。現在効率の更なる向上を目指して開発中である。

一方位置較正では、乾板を貫くビームを乾板接触面近傍で認識し、両乾板の間でビームのパターンを合せる技術を開発した。これにより25 cm \times 24.5 cmの乾板のどこでも(σ_x , σ_y) = (0.82 μ m, 0.57 μ m)の位置精度で較正できた。

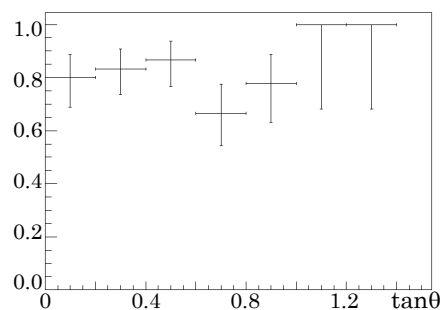


図4. 1枚の乾板中で追跡した飛跡の角度と自動追跡の成功率。

(6) 乾板全面探査とグザイハイパー核(KISO event)の発見

研究の方法(2)で示した、3つの分岐点を持つダブルハイパー核の特徴的な形状を持つ事象を乾板全面で探査する「全面探査法」を可能とする「Vertex Picker」(略称VP)の開発に取り組んだ。仕様を表1に示す。探査速度は従来システムの約300倍に達する。

表1 探査システムの従来と開発中のVertex Pickerとの仕様の比較。

	従来システム	Vertex Picker
対物レンズ	$\times 50$ (NA. 0.9)	$\times 20$ (NA. 0.35)
カメラ	100 Hz / XC_HR300	800 Hz / HXC20
画素(pixels)	512 \times 440	2039 \times 357
撮像域(mm 2)	0.13 \times 0.11	1.1 \times 0.20
繰返し(Hz)	0.3	5

Vertex Pickerは高速撮像と分岐点検出の画像処理からなる。この試運転中に、約800万枚の画像から図5に示す、特徴的な事象を発見した。

「木曾イベント(KISO event)」と名付けたこの事象は、実に4つの分岐点を持つ。A点で静止吸収されたグザイ粒子が、二つのハイパー核を生成し、それぞれBおよびC点で崩壊した。B点での崩壊の娘粒子はD点で11

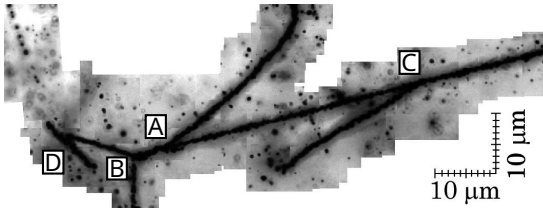
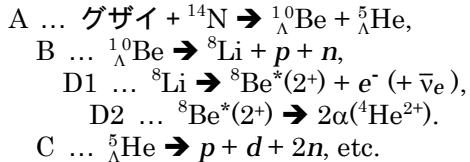


図5. 世界初のグザイハイパー核「KISO event」.

時の方向に最小電離粒子の放出を伴って崩壊した。D点での崩壊が ${}^8\text{Be}^*(2^+) \rightarrow 2{}^4\text{He}^{2+}$ であることが判明し、そこを出発点に反応の全貌が次のように確定した。



グザイの静止吸収点 A でのエネルギー収支を測定したところ、窒素原子核 (${}^{14}\text{N}$) がグザイ粒子を束縛するエネルギー (B_{Xi}) が 4.38 ± 0.25 MeV と求められ、最も深い原子軌道 (3D) での束縛の 0.17 MeV よりはるかに深い束縛であることが分かった。 ${}_{\Lambda}^{10}\text{Be}$ が励起状態で生成されたとしても $B_{\text{Xi}} = 1.11 \pm 0.25$ MeV となり、やはり 3D では説明がつかない。グザイ粒子が核力で束縛した 世界初のグザイハイパー核の発見 で、グザイと原子核間の相互作用が引力的であることを突き止めた。この成果は、科学雑誌「パリティ」(Vol.31 2016-04, pp.12-18) で中性子星との関係で紹介され、新聞(中日新聞 2015年1月19日: 朝刊3面)でも紹介された。

(7) 理論面での進展

無限小変位ガウスローブ関数法をフルに活用して、軽いハイパー核の精密構造計算から未知のラムダ-核子間相互作用、ラムダ-ラムダ相互作用の解明を目指した。本プロジェクトの半ばまでは、ラムダ-核子間相互作用を精力的に研究し、未解明のラムダ-核子間荷電対称性の破れ、N-N結合の解明に光を当てた。これらの総合的研究について、2012年に Few-body systems 誌においてレビュー論文を執筆し、2013年にダウンロード回数においてトップ10に入ったとの証明書を雑誌社からいただいた。また同年、一連のハイパー核の研究業績において、分担者の肥山が33回猿橋賞を受賞した。続いて、ラムダ-ラムダ間相互作用の研究を開始した。ここでは特に、ラムダ-核子間およびラムダ-ラムダ相互作用を活用した中性子星の状態方程式において、これらの相互作用の p-wave の斥力効果が、中性子星の最大質量に大きく影響を及ぼすと指摘することに成功した。

以上の(1)~(7)の成果をもとに、平成28年1月のPAC(プログラム助言委員会)において、我々のE07実験のビーム照射を平成28年度の早い時期に最優先で実施すべきであると提言されるに至った。

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53件)

1. 仲澤和馬、高塚龍之、超巨大ハイパー核としての中性子星:混在ハイペロンの謎、パリティ、(招待論文)、31-4、2016、12-18
2. 仲澤和馬、ダブルハイパー核研究と原子核乾板技術、原子核研究、査読有、60、2016、109-121
3. H. Togashi, E. Hiyama, Y. Yamamoto, M. Takano, Equation of state for neutron stars with hyperons using a variational method, Phys. Rev. C93、査読有、2016、035808-03521、DOI:10.1103/PhysRevC.93.035808
4. K. Nakazawa, 他、Study of double-strangeness nuclear systems with nuclear emulsion.", Physics Procedia、査読有、80、2015、69-73、DOI:10.1016/j.phpro.2015.11.079
5. K. Nakazawa, K. Imai, H. Takahashi, K. Hoshino, 他、The first evidence of a deeply bound state of $\Xi^{-}{}^{14}\text{N}$ system, Prog. Theor. Exp. Phys.、査読有、2015、033D02-1-11、DOI:10.1093/ptep/ptv008
6. J. Yoshida, Emulsion Scanning Systems for Double-strangeness Nuclei, Physics Procedia、査読有、80、2015、62-2、DOI:10.1016/j.phpro.2015.11.072
7. E. Hiyama, 他3名、Alpha-clustered hypernuclei and chiral SU(3) dynamics, Prog. Theor. Exp. Phys.、査読有、013D01、2014
8. K. Nakazawa、Study of double-Lambda hypernuclei at J-PARC., Journal of the Physical Society of Japan、査読有、JPS Conf. Proc.、1、2014、013078-1~4、
9. H. Sako, K. Tanida et.al、Development of a prototype GEM TPC with a gating grid for an H-dibaryon search experiment at J-PARC, Nucl. Instr. Meth. A、査読有、763、2014、65-81、DOI:10.1016/j.nima.2014.06.007
10. B.N. Lu, E. Hiyama, H. Sagawa, 他、Superdeformed hypernuclei within relativistic mean field models, Phys. Rev. C89、査読有、2014、044307-1~7、DOI:10.1103/PhysRevC.89.044307
11. Emiko Hiyama, Shota Ohnishi, B.F. Gibson, and Th. A. Rijken, Three-body structure of the nn system with AN 8722; N coupling, Phys. Rev.C89、査読有、2014、061302-1~6、DOI:10.1103/PhysRevC.89.061302
12. H.-J. Schulze and E. Hiyama、Skyrme force for light and heavy hypernuclei, Physical Review C、査読有、90、2014、047301-1~4、DOI:10.1103/PhysRevC.

- 90.047301
13. K. Nakazawa, J. Yoshida, Double-hypernuclei at J-PARC; E07 experiment, Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei (World Scientific, Singapore, 2014)、査読有、1、2014、132-136、DOI : 10.1142/9789814618229_0025
 14. K. Nakazawa et.al、Progress on the study of double- hypernuclei、J. Phys.、査読有、560、2014、12082、DOI : 10.1088/1742-6596/569/1/012082
 15. R.Kiuchi, K. Tanida, K. Nakazawa et al.、Development of a silicon micro-strip detector for tracking high intensity secondary beams.、Nucl. Instr. Meth. A、査読有、763、2014、399-403、DOI : 10.1016/j.nima.2014.06.060
 16. B.H.Kim, K. Tanida et al.、Search for an H-dibaryon with a Mass near $2m_{\Lambda}$ in $(1S)$ and $(2S)$ Decays、Phys. Rev. Lett.、査読有、110、2013、222002-1~6、DOI : 10.1103/PhysRevLett.110.222002
 17. K. Nakazawa、Experimental Study of the Interaction between Two Lambda Hyperons、Few Body systems、査読有、54、2013、1279-1282、DOI : 10.1007/s00601-012-0521-0
 18. J.K. Ahn, K. Nakazawa, K. Tanida, H. Takahashi, K. Imai, K. Hoshino et al.、Double- hypernuclei observed in a hybrid emulsion experiment、Phys. Rev.C88、査読有、2013、014003-1~4、DOI : 10.1103/PhysRevC.88.014003
 19. K. Nakazawa、Experimental Study of the Interaction between Two Lambda Hyperons、Few Body systems、査読有、2013、DOI:10.1007/s00601-012-0521-0
 20. E. Hiyama、Few-Body Aspects of Hypernuclear Physics、Few Body systems、査読有、53、2012、189-236、DOI: 10.1007/s00601-011-0296-8
 21. E. Hiyama、Gaussian expansion method for few-body systems and its applications to atomic and nuclear physics、Prog. Theor. Exp. Phys. Special Issue、査読有、01A204、2012、計 36 頁、DOI: 10.1093/ptep/pts015
 22. E. Hiyama、Few-Body Aspects of Hypernuclear Physics、Few Body systems、査読有、53、2012、189-236、DOI: 10.1007/s00601-011-0296-8
- [学会発表](計 172 件)
1. K. Nakazawa、Experiment for Double Hypernuclei with Nuclear Emulsion、Academic lecture (招待講演)、2015 年 12 月 22 日、Lashio Univ.、(Myanmar)
 2. K. Nakazawa、Hypernuclear Physics at KEK-PS and J-PARC、11th European Research Conference on Electromagnetic Interaction with Nucleons and Nuclei、2015 年 10 月 31 日 ~ 11 月 7 日、Cyprus
 3. K. Nakazawa、Experimental status of $S=-2$ hypernuclei、12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (基調講演)、2015 年 9 月 7 日 ~ 9 月 12 日、東北大学
 4. K. Nakazawa、Xi-Hypernuclei and Experiments @J-PARC、J-PARC Hadron Salon (招待講演)、2015 年 8 月 3 日 ~ 2015 年 8 月 5 日、茨城県東海村
 5. 仲澤和馬、二重に奇妙な原子核の発見 顕微鏡で眺める宇宙(中性子星) -、岐阜大学ランチタイムセミナー(招待講演)、2015 年 5 月 19 日、岐阜大学
 6. K. Nakazawa、Nuclear matter with hyperon in neutron star under nuclear physics with double strangeness、KMI seminar(名古屋大学理学研究科) (招待講演)、2015 年 4 月 22 日、名古屋大学
 7. 肥山詠美子、厳密少数多体系計算法の確立とその展開、第 922 回九大原子核セミナー(招待講演)、2015 年 1 月 13 日、九州大学(福岡県福岡市)
 8. S. Kinbara, K. Nakazawa, K. Hoshino、et al.、PID method for double strangeness in nuclear emulsion、Workshop on Progress on J-PARC hadron physics in 2014、2014 年 11 月 30 日 ~ 12 月 2 日、J-PARC、(東海村)
 9. 肥山 詠美子、ミクロな世界の 3 体・4 体問題へのいざない、理化学研究所 科学講演会 2014(招待講演)、2014 年 11 月 30 日、東京コンベンションホール(東京都中央区)
 10. H. Ito, K. Nakazawa, K. Hoshino、et al.、Mass production of the large-size nuclear plate for J-PARC E07、HAWAII 2014、2014 年 10 月 7 日 ~ 10 月 11 日、Waikaloa, Hawaii, (USA)
 11. Emiko Hiyama、Structure of few-body hypernuclei、HAWAII2014 (招待講演)、2014 年 10 月 7 日 ~ 10 月 11 日、Waikaloa, Hawaii, (USA)
 12. K. Nakazawa、Double Lambda and Xi hypernuclei、HAWAII 2014, 4th Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (招待講演)、2014 年 10 月 7 日 ~ 10 月 11 日、Waikaloa, Hawaii, (USA)
 13. K. Nakazawa、Experimental progress to study double strangeness systems、International Symposium on Science at J-PARC 2014、2014 年 7 月 12 日 ~ 7 月 15 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)
 14. E. Hiyama、Structure of few-body hypernuclei、Japan-Korea Joint Workshop for Hyperons in Nuclear and Astrophysics with related topics (Hyperon)(招待講演)、2014 年 3 月 9 日、長野

15. K. Nakazawa, Double- hypernuclei at J-PARC, The 7th International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei, 2013年10月27日~10月30日、Beijing (China)
16. E. Hiyama, Recent progress in hypernuclear physics, The 22nd European Conference on Few-Body Problems (招待講演) 2013年9月26日、Pohang, (Korea)
17. 渡部 豊喜, ダブルハイパー核実験 (E07) 用シリコン検出器の準備状況、日本物理学会 2013年秋季大会、2013年9月20日~9月23日、高知大学朝倉キャンパス (高知県高知市)
18. E. Hiyama, Four- and five-body calculation of double Lambda hypernuclei, The 11th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP2013), 2013年6月12日、Uppsala, Sweden
19. Lee Jaeyong, Development of SSD for the Next Experiments at J-PARC, 韓国物理学会, 2013年4月25日、Daejeon (Korea)
20. E. Hiyama, Three- and four-body structure of hypernuclei using cluster model, Clustering Aspects in Nuclei (招待講演) 2013年4月9日、Beijing, (中国)
21. E. Hiyama, S=-1 and S=-2 light hypernuclei structure, International workshop on new trends in the low- energy QCD in the strangeness sector: experimental and theoretical aspects (招待講演) 2012年10月17日、Trento (Italy)
22. K. Nakazawa, Review of double hypernuclear search and future projects at J-PARC, The 2nd International Workshop of Nuclear Emulsion Research and Application (招待講演) 2012年9月24日、Linfen (China)
23. K. Nakazawa, Review of double hypernuclear search and future projects at J-PARC, International Workshop on Strangeness Nuclear Physics (SNP12) (招待講演), 2012年08月29日、大阪
24. K. Nakazawa, Experimental Study of Interaction between Two Lambda Hyperons in Double Hypernuclei, International Conference on Physics in Myanmar (ICPM2012), 2012年02月04日、Mandalay (Myanmar)
25. E. Hiyama, S=-1 and S=-2 Few-Body Systems, The 5th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, 2011年08月24日、Seoul (韓国)
26. K. Nakazawa, Emulsion experiments, overview and progress, GSI seminar (招待講演), 2011年06月21日、ダルムシュタット(ドイツ)

〔図書〕(計 1 件)

1. 名越智恵子, 仲澤和馬, 河合聡, 丸善出版, 放射線とは何かー正しく向き合うための原点, 2011, 135

〔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

<http://www.phys.ed.gifu-u.ac.jp/index-j.htm>

・中日新聞 2015年1月19日: 朝刊3面

「岐大, 宇宙創成の謎に一步」

・岐阜大学グローバルレクチャー

<http://www.gifu-u.ac.jp/about/publication/qlg/>

[nakazawa.html](http://www.gifu-u.ac.jp/about/publication/qlg/nakazawa.html)

Title: The first observation of a Xi-hypernucleus in the world

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仲澤 和馬 (NAKAZAWA Kazuma)

岐阜大学・教育学部・教授

研究者番号: 60198059

(2) 研究分担者

星野 香 (HOSHINO Kaoru)

岐阜大学・教育学部・非常勤講師

研究者番号: 70022738

谷田 聖 (TANIDA Kiyoshi)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号: 00360587

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: 60353372

渡部 豊喜 (WATABE Toyoki)

名古屋大学・大学院理学研究科・技術専門員

研究者番号: 20402422

肥山 詠美子 (HIYAMA Emiko)

理化学研究所・仁科加速器研究センター・准主任研究員

研究者番号: 10311359

(3) 連携研究者

田村 裕和 (TAMURA Hirokazu)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 10192642

今井 憲一 (IMAI Kenichi)

日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・客員研究員

研究者番号: 70025493