

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400278

研究課題名(和文)ハイパー核の生成・崩壊スペクトルと核物質中のハイペロン

研究課題名(英文)Production and decay spectra of hypernuclei, and hyperons in nuclear matter

研究代表者

原田 融 (HARADA, Toru)

大阪電気通信大学・工学部・教授

研究者番号：70238187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：大強度陽子加速器施設(J-PARC)で展開されるハイパー核物理において、核物質中のハイペロンの性質を明らかにするために、歪曲波衝撃近似を用いてハイパー核の生成・崩壊スペクトルを理論的に研究した。その結果、(1) ^3He を標的核とする(K^- , $^-+$)反応によってシグマハイパー核3体系の NN準束縛状態の存在が解明できること、(2) 離散化連続チャネル結合(CDCC)法を用いた3体破砕を含む理論値は $^3\text{He}(K^-, \pi^-)pp$ の実験データをよく再現すること、(3) $^4\text{-}\Sigma\text{-He}$ にp波共鳴状態が存在するを予言し、実験データとの比較から Nや N- N相互作用に関する情報が得られることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We theoretically study production and decay spectra of hypernuclear states at J-PARC experiments within a distorted-wave impulse approximation in order to see properties of hyperons in nuclear matter. The results are as follows: (1) We confirm possible existence of a Sigma NN quasi-bound state as the $1/2^+$ isotriplet state whose signal is clearly observed in the $^3\text{He}(K^-, \pi^-)$ spectrum, whereas a peak of the quasi-bound state is rather reduced in the $^3\text{He}(K^-, \pi^+)$ spectrum owing to the interference effects. (2) Applying the multichannel Green's function constructed by the CDCC method, we show that the calculated spectrum has the ability to fully describe Lambda-p-p breakup continuum states in $^3\text{He}(K^-, \pi^-)$ reactions. (3) We predict that a pole of the S-matrix for a p-wave Sigma resonant state in $^4\text{-}\Sigma\text{-He}$ is located in the complex E plane and that the shape of the conversion spectra in $^4\text{He}(K^-, \pi^-)$ reactions provide valuable information on Sigma N and Sigma N-Lambda N interactions.

研究分野：物理学，原子核理論

キーワード：ハイパー核 ストレンジネス 核反応 チャネル結合法 相互作用 共鳴状態 シグマ粒子 少数体系

1. 研究開始当初の背景

ストレンジネスを含むハイペロン(Λ , Σ , Ξ など)を持つ原子核(ハイパー核)は、通常の世界には存在しないエキゾチックな状態である。約 65 年前、写真乾板を用いた宇宙線の測定で Λ ハイパー核が初めて発見されて以来、今日では加速器を用いた(K^- , π^+)や(π^+ , K^+)反応の実験によって生成され、理論的・実験的研究から 1 粒子ポテンシャルやスピン軌道力などの基本的な性質が明らかにされてきた。ハイペロンは s クォークという不純物を持つために核子(陽子・中性子)と区別され、原子核内ではパウリ排他原理が働かずに原子核の深部まで入り込んで原子核の深部の性質を探るプローブになる。また Λ 粒子は核内で核子の波動関数を縮める糊(のり)として振る舞う。しかし、これらの理解の基礎となる構成粒子間の ΛN , ΣN 相互作用(2体力)については、わずかな散乱データしかなく、核子-核子(NN)相互作用と較べると定量的には未だ理解できてはいない。近年、宇宙における中性子星やコンパクト星の内部では高密度状態のためにハイペロンが混在し、中性子星の最大質量にも強く影響することが分かってきた。最近発見された 2 倍の太陽質量を持つ中性子星 PSR J1614-2230 を説明するためには、核物質中のハイペロンによる 3 体力の性質が高密度核物質の状態方程式の決定に重要な役割を担う必要があると考えられている。ハイパー核の研究は、原子核、素粒子および宇宙物理にも関連する重要な研究分野であり、高密度核物質を解明するためにはその進展が不可欠である。現在、大強度陽子加速器施設(J-PARC)が稼働して、(K^- , π^+)、(π^+ , K^+)や(K^- , K^+)反応で生成されるハイパー核の実験データが蓄積されつつあり、ハイパー核物理の飛躍的な発展が期待されている。

2. 研究の目的

本研究では、J-PARC などで展開されるハイパー核物理において、(K^- , π^+)や(π^+ , K^+)や(K^- , K^+)反応で生成されるハイパー核の構造と反応機構を理論的に研究する。核物質中のハイペロンによる 2 体力・3 体力を解明するために、以下のように 3 体系などのハイパー核の構造に関する性質とその生成・崩壊の反応過程を調べる。

(1) ${}^3\text{He}$ を標的にした(K^- , π^+)反応で生成されるハイパー核 3 体系 ΛNN - ΣNN の構造を求め、 ΣN 相互作用や ΛN - ΣN 結合についての依存性や顕著な性質を探る。

(2) 3 体破碎反応を考慮したスペクトルを求めるために、連続状態を離散化したチャンネル結合(CDCC)法をグリーン関数法に適用して、ハイパー核生成・崩壊スペクトルを求める数値計算コードを開発する。

(3) ${}^4_2\text{He}$ の p 波共鳴状態の存在可能性を検討し、 ΛN - ΣN 結合などの相互作用による影響を明らかにする。

3. 研究の方法

ハイパー核の生成・崩壊スペクトルや反応断面積の計算では、歪曲波衝撃(インパルス)近似による取り扱いが成功を収めている。その反応過程では強い相互作用によってすぐに崩壊するために、準束縛状態や他の複雑な連続状態と絡み合った状態のスペクトルとして観測される。そのため、理論的に予測を行い、実験データを解析してスペクトロスコピー(分光学)を行うためには、生成・崩壊の核反応プロセスを含む信頼性の高い理論的な取り扱いが必要である。そこで本研究では、g 行列などの有効相互作用による微視的モデルに基づき、多配位チャンネルに拡張されたグリーン関数法を活用して理論スペクトルを求め、実験データとの比較を行うという手法を基本とした。

(1) ${}^3\text{He}$ を標的にした(K^- , π^+)反応におけるハイパー核 ΛNN - ΣNN の生成・崩壊スペクトルの計算では、①YN ポテンシャルモデルから g 行列を活用して、ハイペロン-芯核間の畳み込みポテンシャルを求める。② π^- と π^+ スペクトルを多配位チャンネルのグリーン関数法で計算する。③(K^- , π^+)反応の実験データとの比較から、 ΣNN の準束縛状態の存在とその極(pole)による影響を検討する。④生成・崩壊スペクトルから ΣN 相互作用や ΛN - ΣN 結合など 2 体力・3 体力の相互作用に関する情報を取り出すことを試みる。

(2) 3 体破碎反応を含めたスペクトル計算コードの開発では、①3 体破碎の模型空間を取り入れた CDCC 法と多配位チャンネル結合のグリーン関数法を融合する。②模型空間に適した有効相互作用を設定する。③模型空間の収束性と有効相互作用の適用性を調べる。④ ${}^3\text{He}(K^-, \pi^-)pp\Lambda$ 反応に適用して、実験データとの比較から計算法の有効性を検討する。

(3) n チャンネルが結合する 2 体系の S 行列の極の振る舞いを調べるために、①2 体系の局所複素ポテンシャルを設定する。②複素エネルギー空間において、 $n \times n$ 結合リップマン-シュウィンガー(L-S)方程式を解き、 2^n の多重リーマン面それぞれに対する S 行列の極を求める。③($3N$ - Λ)+(3N- Σ)の結合チャンネル計算を実行し、 ${}^4_2\text{He}$ の複素ポテンシャル依存性と p 波共鳴状態の存在可能性を調べる。④ ${}^4\text{He}$ を標的にした(K^- , π^-)反応のスペクトルを計算し、p 波共鳴状態の理論予測を行う。

4. 研究成果

(1) s 殻ハイパー核の束縛エネルギーを再現するハイペロン-核子間の有効相互作用を用いて Σ ハイパー核の 3 体系 ΣNN に準束縛状態(quasibound state)が存在する可能性が高いことを示した。図 1 に、入射運動量を $600\text{MeV}/c$ とする K^- 中間子ビームを用いたときの、 ${}^3\text{He}$ を標的にした(K^- , π^-)反応スペクトルの理論計算を示す。 Σ しきい値付近に、 ${}^3_2\text{He}$ の準束縛状態のピークが明確に見えることが分かる。

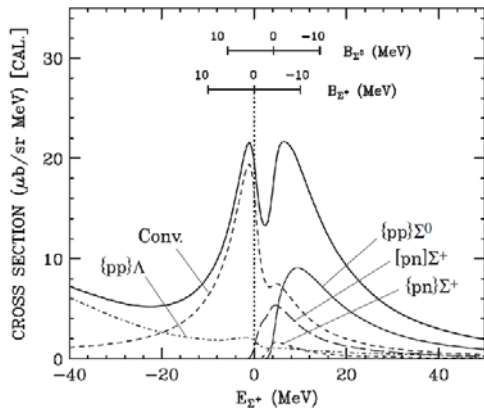


図1 ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^-)$ 反応による Σ ハイパー核の準束縛状態の理論スペクトル。

この状態は全スピン $S=1/2$, 全アイソスピン $T=1$ とその z 成分 $T_z=+1$ を持つ荷電3重項のひとつであり, ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^+)$ 反応によって生成される ${}^3_\Sigma n$ の $T_z=-1$ の準束縛状態も同様に存在することが予想される。しかしながら, 図2のように1990年代にBNLで行われた ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^+)$ 反応のE774実験のデータには対応するピークは観測されなかった。これは, 芯核NNの励起による干渉効果によって準束縛状態の生成断面積が打ち消されるため, 明確なピークとして現われないことが分かった。その結果, 理論値は実験データをよく再現し, Σ NNの準束縛状態の存在と矛盾するものではないことが分かった。20年以上も未解決であった問題を解決するに至った。

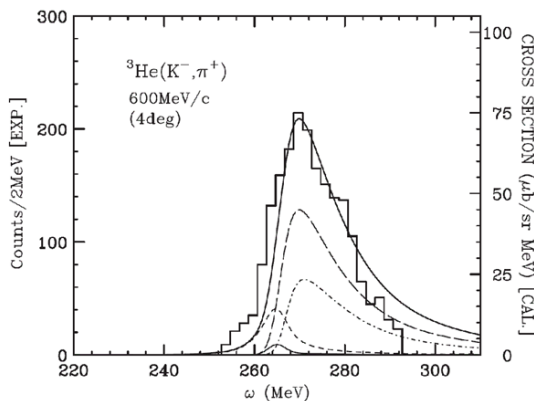


図2 ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^+)$ 反応の理論値とBNL-E774実験データとの比較。

(2) 核物質中のハイペロンの性質には, ハイペロンを含む3体力の性質が強く影響すると考えられており, ANNなどの3体力の解明が望まれる。またハイパー核の状態のほとんどが Λ しきい値付近に現われるため, ハイパー核の精密な解析には3体破砕を考慮した連続状態の記述が必要である。CDCC法とグリーン関数法を融合した計算は, (K^-, π^-) などのハイパー核の生成・崩壊スペクトルをはじめ, いろいろな系への適用が可能であり,

その有用性が期待される。図3には ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^-)\text{pp}\Lambda$ 反応に適用した理論値とBNL-AGS E829実験のデータとの比較を示す。理論値が実験データをよく再現していることが分かった。

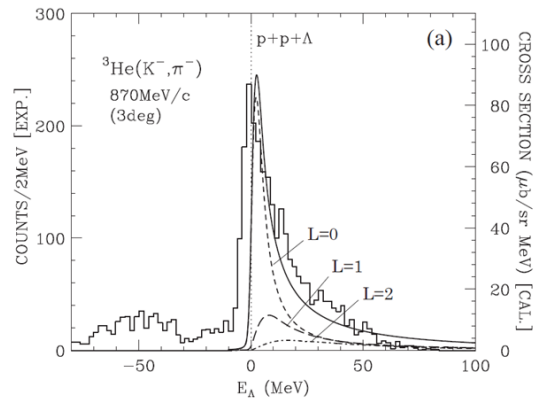


図3 ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^-)\text{pp}\Lambda$ 反応の理論値とBNL-AGS E829実験データとの比較。

(3) 核物質中のハイペロンの性質を明らかにするためには, ハイペロンと核子間の相互作用の解明が不可欠である。特に Σ N相互作用は未だ不定性が大きい。現在のところ, Σ ハイパー核として ${}^4_\Sigma\text{He}$ のs波束縛状態しか発見されていないため, 実験的な情報も限られている。そこでp波状態の ${}^4_\Sigma\text{He}$ のS行列の極の振る舞いを調べた。

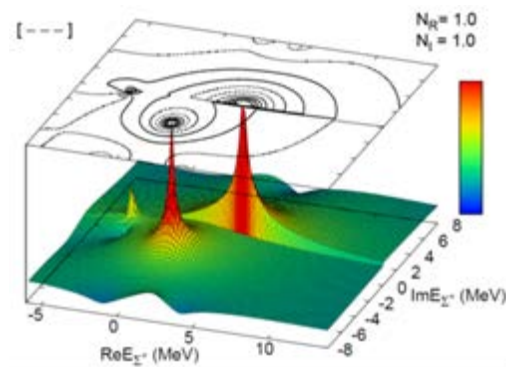


図4 第4リーマン面[---]上での ${}^4_\Sigma\text{He}$ のp波のS行列。手前の極がスペクトルにp波共鳴状態のピークとして現れる。

図4には, 多重リーマン面の第4面[---]上での ${}^4_\Sigma\text{He}$ のp波共鳴状態のS行列の様子を示す。準位幅は極の位置に依存するが, もっともらしい複素ポテンシャルであればp波共鳴状態として存在することが分かった。この状態は, ハミルトニアンが非エルミートである結合チャンネル系であり, 他の分野においても興味深い研究対象である。さらに ${}^4_\Sigma\text{He}$ のp波共鳴状態の存在を実験的に確かめるために, J-PARC実験による1.5GeV/c(散乱角8°)の ${}^4\text{He}(\text{K}^-, \pi^-)$ 生成スペクトルの角分布を

予測した。図5には、その予測スペクトルを示す。実線は包含スペクトル、破線は Λ 粒子の放出を伴う Σ - Λ 転換スペクトルである。幾つかの複素ポテンシャル(A, B, C)によってp波共鳴状態のピークに違いが見られ、複素ポテンシャルがs波束縛状態を同じ程度(Cの場合)であれば明確なピークとして観測されることが分かった。 ${}^4_2\text{He}$ のp波共鳴状態の分析から、新たな ΣN 相互作用の情報が得られると期待できる。

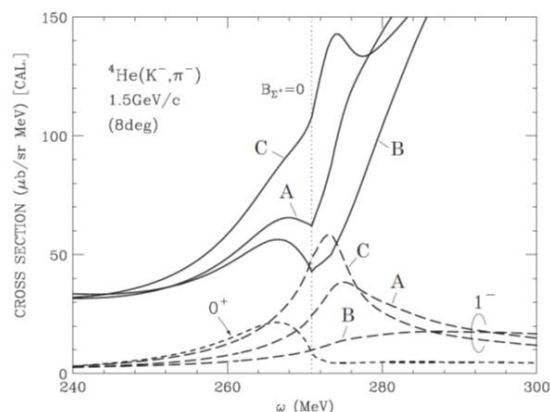


図5 ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-)$ 反応におけるスペクトルの理論予測。

(4) J-PARC E10 実験では、 ${}^6\text{Li}$ を標的核とした (π^-, K^+) 反応による中性子過剰ハイパー核 ${}^6_\Lambda\text{H}$ の生成スペクトルが得られている。また陽子を標的とした素過程 $\pi^-p \rightarrow \Sigma^+K^+$ 反応の断面積の角分布も新たに測定された。新たな実験データを含む素過程 $\pi^-p \rightarrow \Sigma^+K^+$ 反応の振幅を用いて、「最適フェルミ平均の方法」により歪曲波衝撃近似の計算に必要な媒質中の散乱振幅を求めた。その結果、スペクトルの角分布にエネルギー依存性が現われて、実験データを説明できることが分かった。

(5) 殻模型の1粒子波動関数を用いて、 ${}^6\text{Li}$ を標的核にした (π^-, K^+) 反応のスペクトルの理論計算を行い、J-PARC E10 実験の Σ 生成領域の実験データと比較している。現在の解析では、 Σ -原子核間ポテンシャルが斥力的であることが確認されている。 Λ の束縛領域や連続領域のスペクトルの形から ${}^6_\Lambda\text{H}$ の構造や ΛN - ΣN 結合の相互作用などの情報を得るために理論解析を進めている。今後、より詳細な $d+\alpha$ のクラスター模型やCDCC法による連続状態など微視的な模型を用いた記述が望まれる。

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12件)

- ① T. Harada, Y. Hirabayashi,
“P-wave resonant state of the ${}^4_2\text{He}$

hypernucleus in the ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-)$ reaction”, *Physics Letters B*, 査読有, 740, 2015, 312–316.

DOI:10.1016/j.physletb.2014.11.057

- ② T. Harada, Y. Hirabayashi,
“Continuum $pp\Lambda$ spectrum of the ${}^3\text{He}(K^-, \pi^-)$ reaction with continuum discretized coupled channels”, *Nuclear Physics A*, 査読有, 934, 2015, 8–17.
DOI:10.1016/j.nuclphysa.2014.11.007
- ③ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi,
“Airy structure in ${}^{16}\text{O} + {}^{14}\text{C}$ nuclear rainbow scattering”, *Physical Review C*, 査読有, 92, 2015, 024624-1–5.
DOI:10.1103/PhysRevC.92.024624
- ④ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi,
“Further evidence for a dynamically generated secondary bow in ${}^{13}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ rainbow scattering”, *Physical Review C*, 査読有, 92, 2015, 051601-1–5.
DOI:10.1103/PhysRevC.92.051601
- ⑤ R. S. Mackintosh, Y. Hirabayashi, S. Ohkubo, “Emergence of a secondary rainbow and the dynamical polarization potential for ${}^{16}\text{O}$ on ${}^{12}\text{C}$ at 330 MeV”, *Physical Review C*, 査読有, 91, 2015, 062616-1–8.
DOI : 10.1103/PhysRevC.91.024616
- ⑥ T. Harada, Y. Hirabayashi,
“ ΣNN quasibound states in ${}^3\text{He}(K^-, \pi^-)$ reactions at 600 MeV/c”, *Physical Review C*, 査読有, 89, 2014, 054603-1–6.
DOI:10.1103/PhysRevC.89.054603
- ⑦ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi, A. A. Ogloblin, Yu. A. Gloukhov, A. S. Dem’yanova, W. H. Trzaska,
“Refractive effects and Airy structure in inelastic ${}^{16}\text{O} + {}^{12}\text{C}$ rainbow scattering”, *Physical Review C*, 査読有, 90, 2014, 064617-1–6.
DOI : 10.1103/PhysRevC.90.064617
- ⑧ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi
“Similarity between nuclear rainbow and meteorological rainbow: Evidence for nuclear ripples”, *Physical Review C*, 査読有, 89, 2014, 061601-1–5.
DOI : 10.1103/PhysRevC.89.061601
- ⑨ S. Ohkubo, Y. Hirabayashi
“Evidence for a secondary bow in Newton's zero-order nuclear rainbow”, *Physical Review C*, 査読有, 89, 2014, 051601-1–5.
DOI : 10.1103/PhysRevC.89.051601
- ⑩ T. Harada, Y. Hirabayashi,
“Hypernuclear $\Lambda\Lambda$ production by (K^-, K^+) reactions and the $\Lambda\Lambda$ - Ξ mixing in hypernuclei”, *Nuclear Physics A*, 査読有, 914, 2013, 85–90.

- DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.01.020
- ⑪ T. Harada, Y. Hirabayashi, “Production Spectra of the ΣN Quasibound States in ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^{\pm})$ Reactions”, *Few Body Syst.*, 査読有, 54, 2013, 1205–1206.
DOI: 10.1007/s00601-013-0673-6
- ⑫ Y. Hirabayashi, S. Ohkubo, “Unification of A₁ structure in inelastic $\alpha+{}^{16}\text{O}$ scattering and α -cluster structure with core excitation in ${}^{20}\text{Ne}$ ”, *Physical Review C*, 査読有, 88, 2013, 014314-1–6.
DOI:10.1103/PhysRevC.88.014314
- [学会発表] (計 2 3 件)
- ① 原田融, 平林義治, ${}^4\text{He}$ ハイパー核の P 波共鳴状態とリーマン面での S 行列の極, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学 (茨城県・仙台市).
- ② 原田融, 平林義治, ${}^6\text{Li}(\pi^-, \text{K}^+)$ 反応とハイパー核生成スペクトル, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 27 日, 大阪市立大学 (大阪府・大阪市).
- ③ T. Harada, Y. Hirabayashi, Production spectra of neutron-rich hypernuclear states in the ${}^6\text{Li}(\pi^-, \text{K}^+)$ reaction at 1.2 GeV/c, 第 12 回ハイパー核国際会議 (HYP2015), 2015 年 9 月 10 日, 東北大学 (宮城県・仙台市).
- ④ T. Harada, Y. Hirabayashi, Pole of the S-matrix of the ${}^4\text{He}$ hypernucleus on Riemann sheets, 第 12 回ハイパー核国際会議 (HYP2015), 2015 年 9 月 7 日, 東北大学 (宮城県・仙台市).
- ⑤ T. Koike, T. Harada, A. Dote, $\text{K}^- \text{pp}-\text{K}^{\text{bar}0}\text{pn}$ coupled-channel DWIA calculation for (K^-, n) reaction spectrum, 第 12 回ハイパー核国際会議 (HYP2015), 2015 年 9 月 7 日, 東北大学 (宮城県・仙台市).
- ⑥ 原田融, ハイパー核生成とチャンネル結合, KEK 理論センター JPARC 分室・JAEA 先端基礎研究センター共催研究会「ストレンジネス核物理の発展方向」, 2015 年 8 月 4 日, KEK 東海キャンパス (茨城県・東海村).
- ⑦ 原田融, 平林義治, (π^-, K^+) 反応による中性子過剰ハイパー核の生成スペクトル, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 27 日, 早稲田大学 (東京都・新宿).
- ⑧ 梅谷篤史, 元場俊雄, 原田融, ${}^{19}\text{F}$ の生成断面積および M1 遷移の殻模型研究, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 27 日, 早稲田大学 (東京都・新宿).
- ⑨ 椿原康介, 大西明, 原田融, 中性子星内における Isovector potential の影響, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 26 日, 早稲田大学 (東京都・新宿).
- ⑩ K. Tsubakihara, A. Ohnishi, T. Harada, Neutron Star EOS and Symmetry Energy in RMF model with three-body couplings, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Vol.59, No.10, October 7-11, 2014, Waikoloa, Hawaii.
- ⑪ 原田融, (π^-, K^+) 反応によるハイパー核の生成スペクトル, 「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会, 2014 年 9 月 27 日, 熱川ハイツ (静岡県・熱川市).
- ⑫ 原田融, ストレンジネス核物理, 研究会「核と人と宇宙」 in 岩手, 2014 年 6 月 27 日, 花巻温泉「ホテル紅葉館」(岩手県・花巻市).
- ⑬ T. Harada, Reaction for neutron-rich hypernuclei, International workshop on "Future prospect on nuclear physics with strangeness at J-PARC", 2014 年 5 月 31 日, 理研 (埼玉県・和光市).
- ⑭ 小池貴久, 原田融, 土手昭伸, $[\text{K}^- \text{pp}]-[\text{K}^{\text{bar}0}\text{np}]$ 結合チャンネルによる (K^-, n) 反応スペクトル II, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学 (神奈川県・平塚市).
- ⑮ 原田融, 平林義治, ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^-)\Lambda\text{pp}$ と連続状態, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学 (神奈川県・平塚市).
- ⑯ 原田融, ${}^3\text{He}$ を標的にしたハイパー核の生成反応, 「ストレンジネス核の生成・崩壊スペクトルと核物質中のハドロン」公開セミナー(招待講演), 2014 年 3 月 4 日, KEK 東海キャンパス (茨城県・東海村).
- ⑰ T. Harada, Application of Coupled Channel Green's function Method, Nuclear Physics Group Seminar (invited), 2014 年 2 月 5 日, マンダレー大学 (ミャンマー・マンダレー市).
- ⑱ T. Harada, Production and structure of hypernuclei, International symposium on "Neutron star matter in view of nuclear experiments and astronomical observations", 2013 年 10 月 25 日, 京都大学基研 (京都府・京都市).
- ⑲ 小池貴久, 原田融, $[\text{K}^- \text{pp}]-[\text{K}^{\text{bar}0}\text{np}]$ 結合チャンネルによる (K^-, n) 反応スペクトル, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 22 日, 高知大学 (高知県・高知市).
- ⑳ 原田融, ハイパー核の生成・崩壊スペクトル KEK 理論センター東海分室研究会「原子核媒質中のハドロン研究=魅力と課題=」(招待講演), 2013 年 8 月 05 日, KEK 東海キャンパス (茨城県・東海村).
- その他 3 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 融 (HARADA, Toru)
大阪電気通信大学・工学部・教授
研究者番号：70238187

(2) 研究分担者

平林 義治 (HIRABAYASHI, Yoshiharu)
北海道大学・情報基盤センター・准教授
研究者番号：60271714