

令和元年6月18日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05363

研究課題名(和文)中性子過剰ハイパー核の生成・崩壊スペクトルとチャネル結合

研究課題名(英文) Production and decay spectra of the neutron-rich hypernuclei and effects of channels coupling

研究代表者

原田 融 (HARADA, Toru)

大阪電気通信大学・共通教育機構・教授

研究者番号：70238187

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000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、歪曲波衝撃近似によるハイパー核の生成・崩壊のスペクトルの理論計算を行い、チャネル結合の効果と役割を研究した。主な研究成果は、(1)  $6\text{Li}$ を標的核にした $(\pi^-, K^+)$ 反応では中性子過剰ハイパー核 $6\text{H}_\Lambda$ に0.3%程度の混合率があれば、 $\Sigma$ を經由した生成機構によって実験値がよく再現される、(2)  $^{-5}\text{He}$ 核間ポテンシャルが $+30\text{MeV}$ 程度の斥力である、(3) 3体破碎過程を含めた $3\text{He}(\pi, K)$ 反応の理論計算によって $3\text{H}_\Lambda(1/2^+)$ 基底状態の生成断面積が約 $3\mu\text{b}/\text{sr}$ と予測できる、である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハイパー核研究の進展によって、宇宙の物質を構成している陽子や中性子の仲間であるバリオンや湯川粒子のバリエーションなどが担う核力全体の性質が解明され、宇宙にある中性子星やブラックホールの内部構造の理解につながる期待される。本研究でハイペロンと陽子・中性子間にはたらく2体核力や $\Lambda\text{NN}$ などの3体核力の性質についての理解が進み、核物質中でのハイペロンさらにはストレンジネスの役割とその重要性が分かってきたが、さらなる定量的な研究の進展が望まれる。

研究成果の概要(英文)：We study theoretically production and decay spectra of hypernuclei obtained at J-PARC facilities within a distorted-wave impulse approximation in order to see the effects and role of channel coupling between hypernuclear states. The results are as follows: (1) A calculated spectra for a neutron-rich  $6\text{H}_\Lambda$  hypernucleus via the  $(\pi^-, K^+)$  reaction on a  $6\text{Li}$  target suggests that the  $\Sigma$ -mixing probability amounts to about 0.3% via  $\Sigma$  doorways in comparison with the experimental data. (2) A theoretical analysis shows that the  $\Sigma$ - $^{-5}\text{He}$  potential has a repulsive  $+30\text{MeV}$ -strength in the real part. (3) Theoretical calculations of the  $3\text{He}(\pi, K)$  reaction including three-body break-up channels predict that the production cross section of the  $3\text{H}_\Lambda(1/2^+)$  ground state is about  $3\mu\text{b}/\text{sr}$ .

研究分野：物理学，原子核理論，ストレンジネス核物理

キーワード：ハイパー核 ストレンジネス チャネル結合 中性子過剰核 核反応 連続状態 少数多体系

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 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( $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ など)と核子(陽子・中性子)からなる原子核は、ハイパー核(超原子核)と呼ばれており、現在、日本の茨城県東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)などで研究が精力的に進められている。ハイペロンの寿命は約  $10^{-10}$ 秒なので、ハイパー核は通常存在することはできないが、加速器で作られる $\pi$ や $K$ 中間子2次ビームを用いた( $\pi$ ,  $K^+$ ), ( $K^-, \pi$ )や( $K^-, K^+$ )反応から生成することが可能であり、ハイパー核は実験的・理論的にも重要な研究対象である。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むことができる。また $\Lambda$ ハイパー核では $\Lambda$ 粒子が内部で核子の波動関数を縮める糊(のり)として振る舞うなどの性質が明らかにされてきている。しかし、これらの基礎となるハイペロン-核子間にはたらく核力についてはいまだ十分な理解に至っていない。ハイパー核研究の進展によって、ハイパー核の存在形態や核力の性質が明らかになれば、宇宙における中性子星やブラックホールの内部構造の解明の糸口にもなると期待されている。

2008年、赤石らは理論計算によって、中性子過剰な ${}^6_\Lambda\text{H}$ ハイパー核の $0^+$ 状態では $\Lambda$ 粒子の糊の効果に加えて $\Lambda\text{NN}$ の3体力の効果が顕著になり、 ${}^5\text{H}+\Lambda$ の閾値から約5.4 MeVの束縛状態になると予測した。この $\Lambda\text{NN}$ の3体力はコヒーレント $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 結合に起因するものであり、核内での $\Sigma$ 粒子が重要な役割を担っていることを強く示唆するものである。2012年、FINUDA(イタリア)で行われた ${}^6\text{Li}$ (静止 $K^-, \pi^+$ )実験では ${}^6_\Lambda\text{H}$ の束縛状態が発見されたとの報告がなされたが、2014年のJ-PARCでのE10実験では、 ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応による ${}^6_\Lambda\text{H}$ 束縛状態の存在は確認できなかった。この状況を解決するためには、 ${}^6_\Lambda\text{H}$ の芯核である ${}^5\text{H}$ の共鳴状態の有無や $\Lambda$ ポテンシャルの性質、 $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 結合の効果などを再検討し、 ${}^6_\Lambda\text{H}$ の構造とその生成断面積を解明することが不可欠であった。特に核内の $\Sigma$ 粒子の振る舞いや $\Sigma\text{N}$ 核力の性質に関する実験的な情報は極めて限られており、理論的研究からの進展が望まれた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、J-PARCで展開されるハイパー核物理において、( $\pi^-, K^+$ ), ( $K^-, \pi^+$ )や( $K^-, K^+$ )の2重荷電交換反応などで生成される中性子過剰ハイパー核の構造と反応機構を理論的に解明することである。チャンネル結合の重要性の観点から、ハイパー核における $\Sigma$ や $\Xi$ 粒子の混合率(～数%)や $\Sigma\text{N}-\Lambda\text{N}$ や $\Xi\text{N}-\Lambda\Lambda$ 結合による3体力などのコヒーレント的な性質を調べ、いまだ未知の部分が多い相互作用や中性子過剰核の構造などの新しい知見を得ることを目指す。そのために「多重チャンネルを結合したグリーン関数法」の理論的枠組みの改良と拡張を行い、 $p$ 殻核の微視的模型に基づく生成・崩壊スペクトル計算を実行する。とくにJ-PARC E10実験である ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応を用いた ${}^6_\Lambda\text{H}$ 束縛状態の生成断面積の理論解析や、 ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応を用いた $\Sigma$ - ${}^5\text{He}$ 核間ポテンシャルの性質を明らかにする理論計算などに適用する。

### 3. 研究の方法

ハイパー核生成・崩壊スペクトルの予測・解析を行うために、歪曲波衝撃(インパルス)近似(DWIA)と微視的模型に基づいた定式化を行い、「多重チャンネルを結合したグリーン関数法」の理論的枠組みの改良と拡張を行って数値計算を実行する。

(1)  ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応における $\pi^-p \rightarrow K^+\Sigma^-$ 過程の“1段階過程”の中性子過剰ハイパー核の生成・崩壊スペクトルの計算を微視的模型に基づいて、より精密化された模型空間に対して実行する。①軽いハイパー核の束縛エネルギーを再現する $\text{YN}$ の $g$ 行列を用いて、ハイペロン-芯核間の畳み込みポテンシャルを求める。② ${}^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$ 反応のハイパー核生成過程に多配位チャンネル結合のグリーン関数を適用して、中性子過剰ハイパー核 ${}^6_\Lambda\text{H}$ および ${}^6_\Sigma\text{H}$ の生成・崩壊スペクトルを計算し、J-PARC E10実験データを説明することを試みる。③有効 $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 相互作用と $\Sigma$ 混合率の関係やスペクトルへの依存性を調べる。

(2) 原子核を標的としたハドロン生成をDWIAの枠組みで計算する際には、核内 $T$ 行列のエネルギー依存性が現れることが一般的である。にもかかわらず、従来の計算においてはこの効果を見逃すことが多かった。①( $\pi^-, K^+$ )反応に対して素過程 $\pi^-p \rightarrow K^+\Sigma^-$ の生成断面積の角分布に「最適フェルミ平均の方法」に適用して、 $\Sigma$ 生成反応の核内 $T$ 行列を求める。②J-PARC実験の反応解析に必要な( $K^-, \pi$ )や( $K^-, K^+$ ), ( $K^-, \text{N}$ )などの反応の核内 $T$ 行列について検討する。

(3) ( $\pi^-, K^+$ )反応による“2段階過程”で生成される中性子過剰ハイパー核の生成・崩壊スペクトルの系統的な計算を実行する。 $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ ,  $\pi^0p \rightarrow K^+\Lambda$ および $\pi^-p \rightarrow K^0\Lambda$ ,  $K^0p \rightarrow K^+n$ 過程について、歪曲波インパルス近似による定式化を行い、生成スペクトルを計算するための数値計算コードを開発する。

(4) 多重チャンネル結合のグリーン関数法はチャンネル間のダイナミクスを正確に取り扱うことができるので、連続状態離散化チャンネル結合(CDCC)法などとの親和性が高い。①グリーン関数法によるスペクトル関数の精密化を図るために、CDCC法を取り入れた多重チャンネル結合のグリーン関数を用いてスペクトル計算を実行し、3体破砕反応を含めた模型空間での生成・崩壊スペクトルを求める。② ${}^3\text{He}$ を標的核にした( $\pi^+, K^+$ )や( $\pi^-, K^0$ )反応に適用し、 $pp\Lambda$ や $pn\Lambda$ 連続状態のスペクトルや ${}^3_\Lambda\text{H}(1/2^+)$ 束縛状態の生成断面積を求める。

#### 4. 研究成果

(1)  ${}^6\text{Li}$  を標的核とする  $(\pi, K^+)$  反応による中性子過剰ハイパー核の生成・崩壊スペクトルを微視的な模型空間を用いて理論計算を行い、J-PARC E10 実験データと比較した。図 1 は、 $\Sigma$  混合の割合が(a)1.58%, (b)0.79%, (c)0.32%, (d)0.07%をそれぞれ仮定した場合の  ${}^5\text{H}+\Lambda$  閾値付近の  ${}^6\text{Li}(\pi, K^+){}^6\Lambda\text{H}$  反応の生成スペクトルを示す。中性子過剰ハイパー核  ${}^6\Lambda\text{H}$  はピークとして観測されていないが、その生成スペクトルは  $\Sigma$  混合の割合が 0.3%程度であれば“1段階過程”の生成機構による理論計算でよく再現されることがわかった。また詳細な解析から、観測できる十分な生成断面積が得られない理由の一つとして、芯核  ${}^5\text{H}$  が共鳴状態としての存在に疑いがあり、 $\Lambda$  粒子が束縛しうるだけの引力ポテンシャルを十分に得ることができないことが考えられる。また、この反応過程では生成される  ${}^6\Lambda\text{H}$  は  $1^+$ 状態に限られるために、 $\Sigma$  混合が大きいと予想されている  $0^+$ 状態ではないことにも注意が必要である。したがって、コヒーレントな  $\Sigma\text{N}-\Lambda\text{N}$  結合による  $\Lambda\text{NN}$  の 3 体力の解明についてはまだ決着がついていない状況にある。

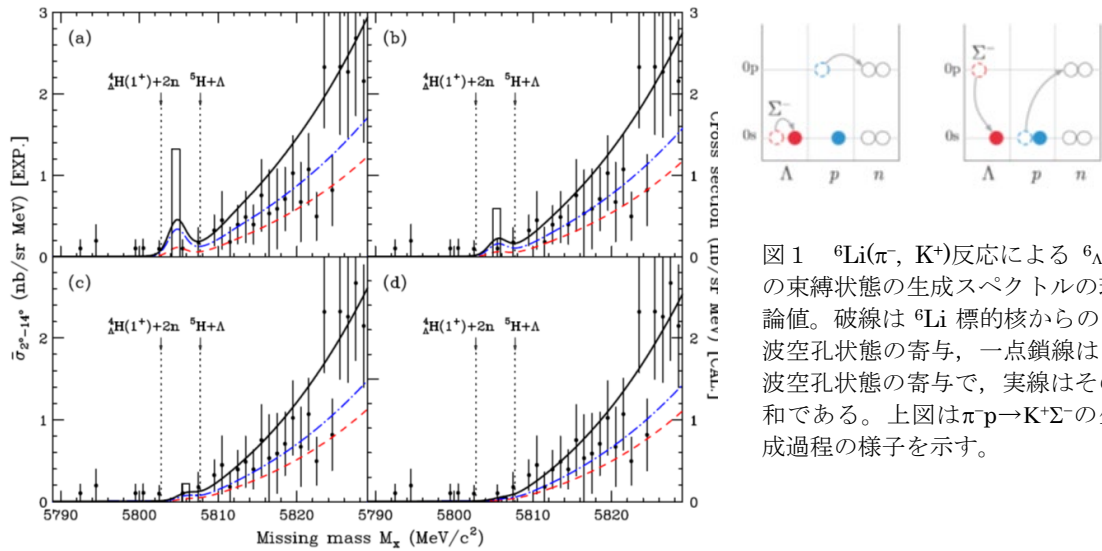


図 1  ${}^6\text{Li}(\pi, K^+)$  反応による  ${}^6\Lambda\text{H}$  の束縛状態の生成スペクトルの理論値。破線は  ${}^6\text{Li}$  標的核からの p 波空孔状態の寄与、一点鎖線は s 波空孔状態の寄与で、実線はその和である。上図は  $\pi\text{-p} \rightarrow \text{K}^+\Sigma^-$  の生成過程の様子を示す。

(2)  $\Sigma$ - ${}^5\text{He}$  核間ポテンシャルの性質を明らかにするために、 ${}^6\text{Li}$  を標的核とする  $(\pi, K^+)$  反応による  $\Sigma$  領域のスペクトルを DWIA の枠組みで計算して、J-PARC E10 実験データと比較した。 $\Sigma$ - ${}^5\text{He}$  核間ポテンシャルの実部と虚部の大きさを変化させて、実験データのスペクトルを再現できるかを詳細に調べた。図 2 には、ウッズ-サクソン (WS) 型に仮定し、そのポテンシャルの虚部を  $-40\text{MeV}$ 、実部の大きさを  $-10\text{MeV} \sim +60\text{MeV}$  と変化させたとき、 $\Sigma$  領域における  ${}^6\text{Li}(\pi, K^+)$  反応の包含スペクトルの理論値の振る舞いを示す。その結果、実験データのスペクトルとの比較から、 $\Sigma$ - ${}^5\text{He}$  核間ポテンシャルの大きさの実部が  $+30\text{MeV}$  の斥力で虚部が  $-40\text{MeV}$  のとき、よく再現することが分かった。この  $\Sigma$ - ${}^5\text{He}$  核間ポテンシャルの性質は、 ${}^{28}\text{Si}$  や  ${}^{208}\text{Pb}$  を標的核とした  $(\pi, K^+)$  反応の包含スペクトルの理論解析の結果とも一致しており、 $\Sigma$  核間ポテンシャルは  $+30\text{MeV}$  程度の斥力的であることが確かめられた。

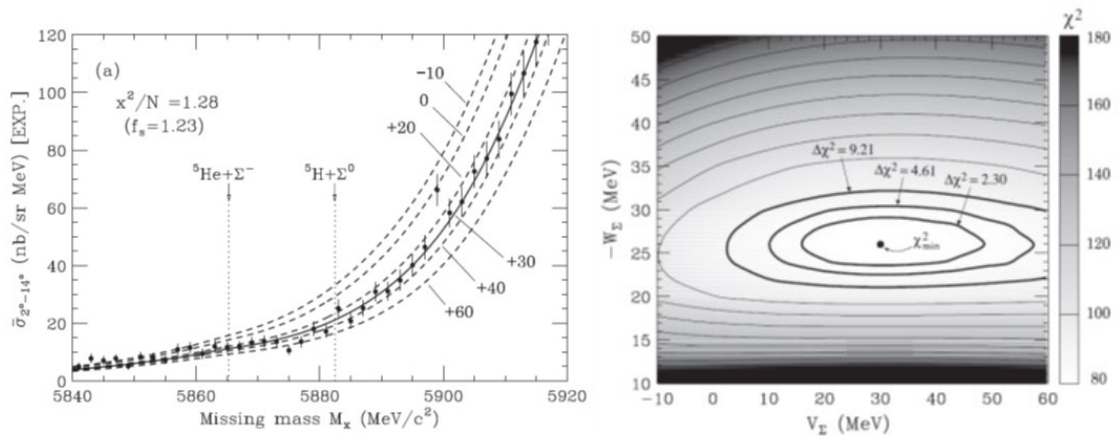


図 2 左図： ${}^6\text{Li}(\pi, K^+)$  による  $\Sigma$  領域の生成スペクトルの理論値。右図：ウッズ-サクソン (WS) 型に仮定したポテンシャルの実部  $V_\Sigma$  と虚部  $W_\Sigma$  による実験データのカイ 2 乗値。 $(V_\Sigma, W_\Sigma) = (+30\text{MeV}, -40\text{MeV})$  のとき最も実験データとの一致が良い。

(3) 原子核を標的とした  ${}^6\text{Li}(\pi, K^+)$  反応では、素過程  $\pi\text{-p} \rightarrow \text{K}^+\Sigma^-$  反応は  $\text{N}^*$  共鳴状態に関連するため、核内での媒質効果は重要である。J-PARC での実験データとの比較では、標的核に対

する角分布が必要になるため、「最適フェルミ平均の方法」を適用して $\Sigma$ 生成断面積の角分布を求めることができた。角分布には強いエネルギー依存性が現れ、スペクトルを再現するためにはこの効果が不可欠であることが分かった。

(4)  $\Xi N$  有効相互作用から微視的な畳み込みポテンシャル模型を用いて、 $\Xi$ 核間ポテンシャルを計算した。これを用いて、J-PARC で計画されている $\Xi$ -原子のエネルギーシフトと幅を評価した。さらに(K, K<sup>+</sup>)反応による<sup>12</sup>Cを標的核とする中性子過剰な $\Xi$ ハイパー核の生成・崩壊スペクトルを計算し、J-PARC E05における実験データの理論解析を進める準備を行った。

(5) 連続状態離散化チャンネル(CDCC)を考慮した3体破碎過程を含めた模型空間で、<sup>3</sup>He( $\pi$ , K)反応によるpp $\Lambda$ やpn $\Lambda$ 連続状態のスペクトルを計算した。<sup>3</sup>He( $\pi^+$ , K<sup>+</sup>)反応ではアイソスピンT=1のpp $\Lambda$ 状態のみが励起される。一方、<sup>3</sup>He( $\pi^-$ , K<sup>+</sup>)反応ではアイソスピンT=0, 1が励起されるため、<sup>3</sup> $\Lambda$ H(1/2<sup>+</sup>)の基底状態も生成される。図3には、CDCC波動関数を用いて計算したpp $\Lambda$ の連続状態スペクトル、<sup>3</sup> $\Lambda$ H(1/2<sup>+</sup>)基底状態とpn $\Lambda$ 連続状態のスペクトルの理論値を示す。軽い標的核の反応過程で重要な反跳効果を考慮することで、<sup>3</sup> $\Lambda$ H(1/2<sup>+</sup>)基底状態の生成断面積は約3  $\mu$  b/srであることが予測された。

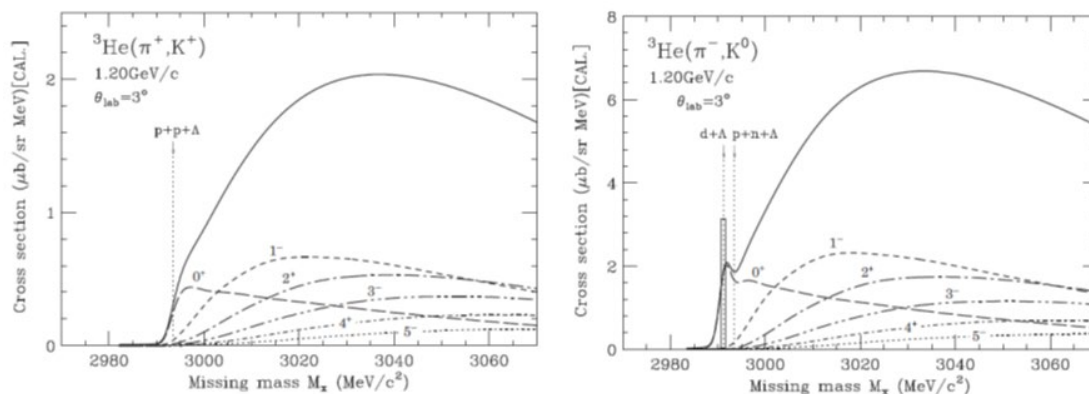


図3 左図：<sup>3</sup>He( $\pi^+$ , K<sup>+</sup>)反応によるpp $\Lambda$ の連続状態スペクトルの理論値。右図：<sup>3</sup>He( $\pi^-$ , K<sup>0</sup>)反応による<sup>3</sup> $\Lambda$ H(1/2<sup>+</sup>)基底状態とpn $\Lambda$ 連続状態のスペクトルの理論値。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- ①T. Harada, Y. Hirabayashi, "Production Spectra of  $^3\text{He}(\pi, K)$  Reactions with Continuum Discretized Coupled Channels", JPS Conference Proceedings, 査読有, 2019
- ②T. Harada, R. Honda, Y. Hirabayashi, "Repulsion and absorption of the Sigma-nucleus potential for Sigma-- $^5\text{He}$  in the  $^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  reaction", Physical Review C, 査読有, 97, 2018, 024601-1--13.  
DOI:10.1103/PhysRevC.97.024601
- ③原田 融, "シグマハイパー核はどこまでわかったか?--原子, 原子核, 中性子星で紐解く $\Sigma$ 粒子の謎", 日本物理学会誌, 査読有, 73, 2018, 542--550.  
DOI:10.11316/butsuri.73.8\_542
- ④T. Harada, Y. Hirabayashi, "Production of a neutron-rich  $^6\text{H}_\Lambda$  hypernucleus in the  $^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  reaction", Physical Review C, 査読有, 95, 2017, 044610-1--10.  
DOI:10.1103/PhysRevC.95.044610
- ⑤S. Ohkubo, Y. Hirabayashi, A. A. Ogloblin, "Existence of inelastic supernumerary nuclear rainbow in  $^{160}\text{+}^{12}\text{C}$  scattering", Physical Review C, 査読有, 96, 2017, 024607-1--6.  
DOI:10.1103/PhysRevC.96.024607
- ⑥T. Harada, Y. Hirabayashi, "Pole of the S matrix of the  $^4\text{He}_\Sigma$  hypernucleus on Riemann sheets", JPS Conference Proceedings, 査読有, 17, 2017, 011001(012008).  
DOI:10.7566/jpscp.17.012008
- ⑦T. Harada, Y. Hirabayashi, "Production spectra of neutron-rich hypernuclear states in the  $^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  reaction at 1.2 GeV/c", JPS Conference Proceedings, 査読有, 17, 2017, 011001(013002).  
DOI:10.7566/jpscp.17.013002
- ⑧T. Koike, T. Harada, A. Dote, "K-pp-Kbar0np coupled-channel DWIA calculation for (K-, n) reaction spectrum", JPS Conference Proceedings, 査読有, 17, 2017, 011001(082004).  
DOI:10.7566/jpscp.17.082004
- ⑨A. Ohnishi, K. Tsubakihara, T. Harada, "Neutron Star Matter EOS in RMF with Multi-Body Couplings", JPS Conference Proceedings, 査読有, 14, 2017, 20811.  
DOI:10.7566/JSPSC.14.020811

⑩S. Ohkubo, Y. Hirabayashi, "Evidence for a dynamically refracted primary bow in weakly bound  $^9\text{Be}$  rainbow scattering from  $160^\circ$ ", Physical Review C, 査読有, 94, 2016, 034601-1--5. DOI:10.1103/physrevc.94.034601

⑪D. Ichinkhorlor, M. Aikawa, S. Chiba, Y. Hirabayashi, K. Kato, "Low energy scattering cross sections for  $n + ^6, ^7\text{Li}$  reactions using the continuum-discretized coupled-channels method", Physical Review C, 査読有, 93, 2016, 064612-1--7. DOI:10.1103/PhysRevC.93.064612

〔学会発表〕(計 13 件)

- ① 原田 融, 他,  $(\pi, K)$  反応によるハイパー核励起状態のスペクトル, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019.
- ② 原田 融, ハイパー核生成とチャネル結合, 2017 年度 KEK 理論センターJ-PARC 分室活動総括研究会, 2018.
- ③ 原田 融, 他,  $(\pi^-, K^+)$  反応によるハイパー核励起状態, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018.
- ④ T. Harada, et al., Production spectra of  $^3\text{He}(\pi, K)$  reactions with continuum discretized coupled channels, 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018), 2018.
- ⑤ 原田 融,  $\Sigma$  ハイパー核の理論計算と  $\Sigma N$  相互作用, 第 2 回「物質階層を横断する会」ハドロン・原子核・原子・分子合同ミーティング—  $\Sigma p$  散乱実験の現状および  $\Sigma N$  相互作用に関連した話題 一, 2018.
- ⑥ 原田 融, シグマハイパー核からストレンジネス核物理へ, 永江知文先生還暦研究会「ストレンジネス核物理の進展と今後の展望」, 2018.
- ⑦ 大西 明, 他, 多体結合を含む RMF による中性子星とハイパー核, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017.
- ⑧ 原田 融, 他,  $^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  反応と  $\Sigma$  核ポテンシャル, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017.
- ⑨ 原田 融, ハイパー核の物理, KEK 理論センター研究会「ハドロン・原子核物理の理論研究最前線 2017」, 2017.
- ⑩ 原田 融,  $\Xi$ -原子と  $\Xi$  核ポテンシャル, 第 6 回「ストレンジネス核物理を考える会」—グザイ原子生成について考える—, 2017.
- ⑪ 原田 融,  $(K^-, K^+)$  反応による  $\Xi$ -ハイパー核, ダブル  $\Lambda$  ハイパー核の生成, 第 7 回「ストレンジネス核物理を考える会」—ダブル  $\Lambda$  ハイパー核研究の現在と近未来—, 2017.
- ⑫ 原田 融, 他,  $^6\text{Li}(\pi^-, K^+)$  反応による中性子過剰ハイパー核  $^6\text{H}_\Lambda$  の生成, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017.
- ⑬ 椿原 康介, 他, 多体結合を含む相対論的平均場モデルにおける高密度状態方程式, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：平林 義治

ローマ字氏名：HIRABAYASHI, Yoshiharu

所属研究機関名：北海道大学

部局名：情報基盤センター

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：6 0 2 7 1 7 1 4

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：梅谷 篤史

ローマ字氏名：UMEYA, Atsushi

研究協力者氏名：小池 貴久

ローマ字氏名：KOIKE, Takahisa

※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、研究者個人に帰属されます。