

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03954

研究課題名(和文) 多重チャンネル結合法によるダブルストレンジネス原子核の生成・崩壊スペクトル

研究課題名(英文) Production and Decay spectra of doubly strange hypernuclei studied in multi-channels coupling calculations

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ダブルストレンジネス核の生成・崩壊を理論的に解明することを目的に、生成・崩壊スペクトル計算において歪曲波インパルス近似の改良と数値計算コードの開発を進めた。主な研究成果は(1)原子核を標的にした(K-, K+)反応によるハイパー核の生成スペクトルに媒質効果によるエネルギー依存性が現れる、(2)9Beを標的にした(K-, K+)反応による準自由スペクトルの解析から、核ポテンシャルの実部の大きさは 17 ± 6 MeVの引力になる、(3)精密な中間子歪曲波を用いた(pi-, K+)反応によるハイパー核生成スペクトルの理論値は、実験データの絶対値と質量依存性をよく再現する、である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ストレンジネス核物理の進展によって、宇宙の物質を構成しているバリオン(陽子や中性子の仲間)や湯川粒子のパイ中間子などのメソンが担う核力全体の性質が解明され、中性子星やブラックホールなど宇宙の成り立ちへの理解につながると期待される。また陽子・中性子やハイペロン間にはたらくバリオン2体核力や、NN・Nなどの3体核力の性質についての研究が進み、核物質中でのハイペロンなどのストレンジネスの役割とその重要性が明らかにされてきた。さらなる研究の推進が望まれる。

研究成果の概要(英文)：To theoretically understand the production and decay of double-strangeness nuclei, we have improved the framework of the distorted wave impulse approximation for calculating production reaction spectra and developed numerical computation codes. The main research results are as follows: (1) The production spectra of hypernuclei via (K-, K+) reactions targeting atomic nuclei exhibit a unique energy dependence due to medium effects; (2) Analysis of the quasi-free spectra of hypernuclei produced via (K-, K+) reactions on a 9Be target revealed that the real part of the Λ -nucleus potential is an attractive force of 17 ± 6 MeV; (3) Using precise meson distorted waves, we calculated the hypernuclei production spectra via (pi-, K+) reactions and successfully reproduced the experimental data regarding the mass dependence and absolute values of the production cross sections.

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 チャンネル結合 核反応 連続状態 インパルス近似 歪曲波

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。

1. 研究開始当初の背景

ダブルストレンジネス核に関する新たな実験データが報告された。エマルジョン実験で得られたデータの再解析では、KISO イベントと呼ばれる $\Xi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{10}_{\Lambda}\text{Be} + {}^5_{\Lambda}\text{He}$ から Ξ ハイパー核状態 $\Xi\text{-}^{14}\text{N}$ が同定され、 Ξ 核ポテンシャルの実部が $U_{\Xi} = -14 \text{ MeV}$ の引力であることが示された。エマルジョン実験 J-PARC E07 では、その 10 倍のイベントの発見につながると期待された。J-PARC E03 実験では、 ${}^{12}\text{C}$ を標的核とした (K^-, K^+) 反応による Ξ ハイパー核 ${}^{12}_{\Xi}\text{Be}$ の生成スペクトルが測定され、その解析が進められていた。また J-PARC では Ξ 原子の X 線測定実験による Ξ 核ポテンシャルの研究や、 ${}^6\text{Li}(K^-, K^+)$ 反応からの ${}^7_2\text{H} \rightarrow {}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H} + 2n$ によって ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ を生成する実験も計画されていた。まもなく待ち望んでいたダブルストレンジネス核の全貌が明らかになると大いに期待された。一方、核物理の研究分野では、2010 年に 2 倍の太陽質量を持つ中性子星が発見されて以降、ハイペロン・パズル（中性子星内部にハイペロンが混在すると状態方程式が軟らかくなり、2 倍の太陽質量を支えきれずにブラックホールになってしまう）という大きな問題に直面していた。ダブルストレンジネス核の研究によって核物質中のバリオン相互作用が解明できれば、このパズルを解くことができると思われた。

我々の研究グループは、 $\Xi\text{N-}\Lambda\Lambda$ 結合によって $\Lambda\Lambda$ ハイパー核に数パーセントの Ξ 混合が存在していると、この Ξ 成分を戸口の状態 (Doorway) にする 1 段階過程 $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ が直接 $\Lambda\Lambda$ ハイパー核の状態を生成できる可能性を調べていた。そしてダブルストレンジネス核の理論的研究のさらなる進展によって、核物質中の ΞN や $\Xi\text{N-}\Lambda\Lambda$ 結合などの相互作用の解明につながると考えていた。

2. 研究の目的

本研究課題では、「多重チャネルを結合したグリーン関数法」を用いて、 (K^-, K^+) 反応によるダブルストレンジネス核の生成・崩壊スペクトルを理論的に解明することを目的とする。そのためには、 (π^+, K^+) や (K^-, π^-) 反応による Λ, Σ ハイパー核の生成・崩壊スペクトルの理解も必要である。したがって、 (K^-, K^+) 反応および (π^+, K^+) や (K^-, π^-) 反応による生成・崩壊スペクトルの研究を進め、精密な数値計算を可能にする計算コードをあわせて開発する。そして実験スペクトルや Ξ 原子の X 線データの理論解析から、 Ξ 核ポテンシャルや、 ΞN , $\Lambda\Lambda$ の 2 体核力や ΛNN , $\Lambda\Lambda\text{N}$ の 3 体核力の性質を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

ダブルストレンジネス核の生成・崩壊スペクトルを理論的に解明するためには、より精密な波動関数が必要である。また原子核を標的にした反応断面積を理論的に評価するためには、ストレンジネス核の構造と核反応の両面の理解が不可欠である。実験データに対する信頼性の高い理論解析を実行していくために、歪曲波インパルス近似の改良と数値計算コードの拡張を進める。具体的な方法は以下の通りである：

(1) 歪曲波インパルス近似の枠組みで、原子核を標的とした (K^-, K^+) 反応による Ξ ハイパー核の生成・崩壊スペクトルを求めるために必要である、素過程 $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ の生成微分断面積にエネルギー依存性を取り入れる。そこで①我々が提唱してきた「最適フェルミ平均」(OFA) の方法を $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ 反応に適用して、エネルギー依存性を調べる。② ${}^{12}\text{C}$ を標的とした (K^-, K^+) 反応による Ξ の準自由スペクトルを計算し、その特徴を明らかにする。

(2) 原子核を標的核にした (K^-, K^+) 反応による Ξ 準自由スペクトルの実験データを理論的に解析し、 Ξ と原子核との間のポテンシャルを決定することができるかを試みる。そこで① ${}^9\text{Be}$ を標的核にした (K^-, K^+) 反応による Ξ 準自由スペクトルを、エネルギー依存性を考慮した素過程の生成断面積を用いて、歪曲波インパルス近似による計算を行う。②BNL-E906 の実験データに対して、 Ξ 核ポテンシャルにウッズ-サクソン (WS) 型を仮定し、その実部と虚部の大きさ (V_0, W_0) をパラメータにした $\chi^2\text{-fit}$ により (V_0, W_0) の値を決定する。③BNL-E778 実験による ${}^{12}\text{C}$ を標的核にした Ξ 準自由スペクトルに対しても同様の解析を試みる。

(3) Ξ 核ポテンシャルの性質を詳細に決定するために、 Ξ 生成断面積の絶対値に対する評価の精度を高める必要がある。そこで① K や π 中間子に対する光学ポテンシャルを用いてクライン-ゴルドン方程式を解き、エネルギー依存性を考慮した精密な歪曲波を求める。② (K^-, π^-) や (π^-, K^+) 反応による Λ, Σ ハイパー核生成・崩壊スペクトルを求め、様々な標的核の実験データと比較して歪曲波の妥当性を検討する。③これらの精密な歪曲波を (K^-, K^+) 反応に適用し、 Ξ ハイパー核の生成断面積を計算する。

4. 研究成果

ダブルストレンジネス核などの生成・崩壊を理論的に解明するために、歪曲波インパルス近似の枠組みの改良や波動関数の精密化に合わせて、計算コードの開発を進めた。具体的な研究成果は以下の通りである：

(1) 「最適フェルミ平均」(OFA)の方法を適用して、 (K^-, K^+) 反応による Ξ 準自由スペクトルを計算した。図1に、核物質中での $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ 反応による Ξ の生成断面積とフェルミガス模型での ^{12}C を標的核にした Ξ 準自由スペクトルの理論値を示す。核物質中での素過程の生成断面積には核内核子のフェルミ運動などの媒質効果によって特有のエネルギー依存性が現れる。その結果、原子核を標的核にした (K^-, K^+) 反応の Ξ 準自由スペクトルの形状に大きな影響を与えることが分かった。(文献 [1])

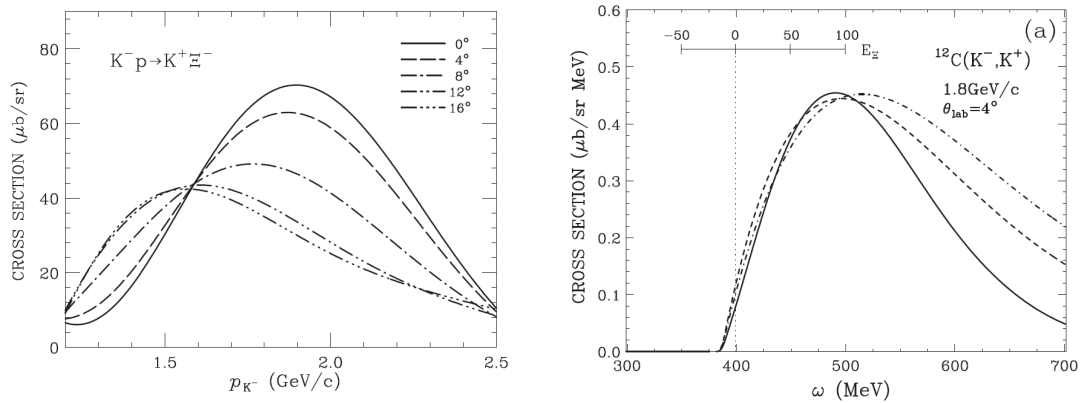


図1 左図：核物質中での $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ 反応による Ξ 生成の微分断面積の理論値。 $\theta_{lab} = 0^\circ - 16^\circ$ を示す。右図：フェルミガス模型での ^{12}C を標的核にした Ξ 準自由スペクトルの理論値(実線)。

(2) 素過程 $K^-p \rightarrow K^+\Xi^-$ 反応のエネルギー依存性を考慮して、 ^9Be を標的核にした (K^-, K^+) 反応による Ξ 準自由スペクトルを計算し、BNL-E906の実験データと比較した。図2に、WS型の Ξ 核ポテンシャルの実部と虚部の大きさ(V_0, W_0)をパラメータにして χ^2 -fitを行った計算結果と、 $V_0 = -17$ MeV, $W_0 = -5$ MeVの Ξ 核ポテンシャルを用いたときの理論値と実験データとの比較を示す。我々の歪曲波インパルス近似による理論値が実験データをよく再現していることが分る。その結果、実部 V_0 の値は $V_0 = -17 \pm 6$ MeVと決まるが、虚部 W_0 の値を決めることはできないことが示された。いまだ Ξ 核ポテンシャルの情報ほとんどない状況のため、この $V_0 = -17 \pm 6$ MeVの値は重要な理論解析の結果となっている。(文献 [2])

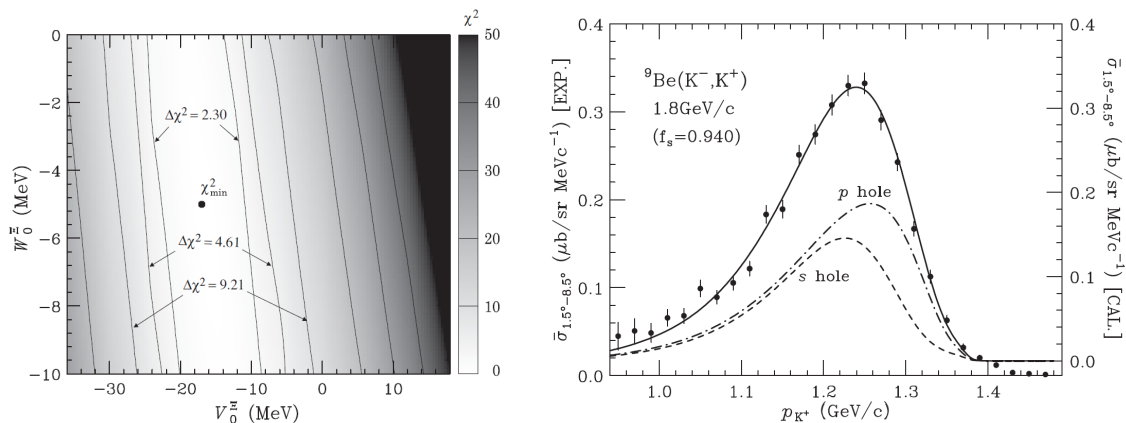


図2 左図： (V_0, W_0) による χ^2 の等高線図。 $\Delta\chi^2$ の値はそれぞれ68%, 90%, 98%の信頼度を示す。右図： ^9Be を標的核にした Ξ 生成スペクトルの理論値と実験値BNL-E906との比較。計算には $V_0 = -17$ MeV, $W_0 = -5$ MeVの Ξ 核ポテンシャルを用いた。

(3) K^\mp や π^\pm 中間子のクライン-ゴールドン方程式を解いて求めた歪曲波を用いて、 ^{12}C , ^{28}Si , ^{58}Ni , ^{115}In , ^{209}Bi を標的核にした (π^-, K^+) 反応による Σ ハイパー核生成・崩壊スペクトルを求め、KEK-E438実験データとの比較を行った。 Σ 核ポテンシャルの実部と虚部には、有効質量の方法によってエネルギー依存性を考慮したものを採用した。図3に、 ^{27}Al と ^{208}Pb における Σ

核ポテンシャル DD-A' の実部と虚部の振る舞いを示す。これらの Σ 核ポテンシャルは、これまで示唆されている Σ 核ポテンシャルと類似の特徴を持っており、それをを用いた Σ 生成スペクトルの理論値は実験データをよく再現できることを示した。(文献 [3])

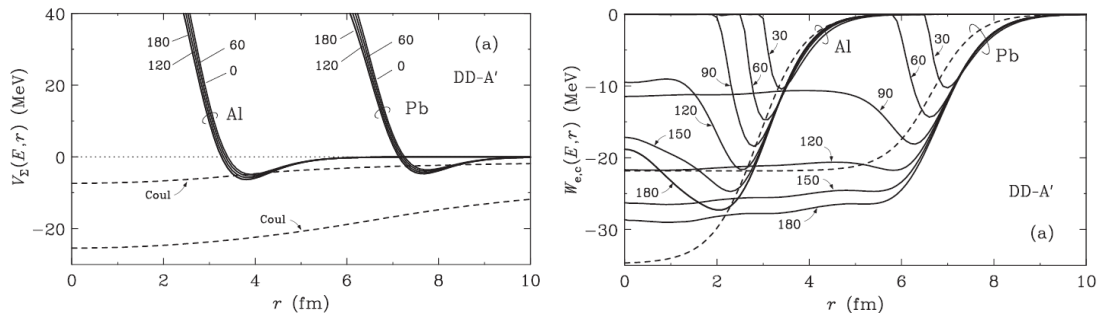


図3 左図: ^{27}Al と ^{208}Pb の Σ 核ポテンシャル DD-A' の実部のエネルギー依存性。 Σ 入射エネルギー $E = 0 - 180$ MeV の場合。右図: その虚部のエネルギー依存性。実線は $\Sigma N \rightarrow \Sigma N'$ 過程からの寄与を、破線は $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ 過程からの寄与を示す。

(4) 「最適フェルミ平均」(OFA) 法には、前方(K^-, π^-)反応などの移行運動量 q が小さい場合に、生成断面積を計算することができないという理論的な適用限界があった。これは OFA 法を提唱した時から問題点であった。しかし歪曲波による核内の局所運動量を考慮することによって、OFA 法の取り扱いが拡張(Extended OFA)され、この問題を解決することができることが分った。図4に、クライン-ゴールドン方程式による歪曲波から求めた局所移行運動量の理論値と、EOFA 法による核内での素過程 $K^- n \rightarrow \pi^- \Lambda$ 反応の微分断面積の計算値を示す。その結果、 ^{12}C を標的核にした(K^-, π^-)反応による $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の生成微分断面積の理論値は、従来の理論値よりも実験データをよく再現できることが分った。また OFA 法がインパルス近似より進んだ取り扱いである Gurvitz の最適運動量近似の拡張になっていることから、我々の計算した理論値は、歪曲波インパルス近似をさらに改良した計算であるといえる。(文献 [3, 4])

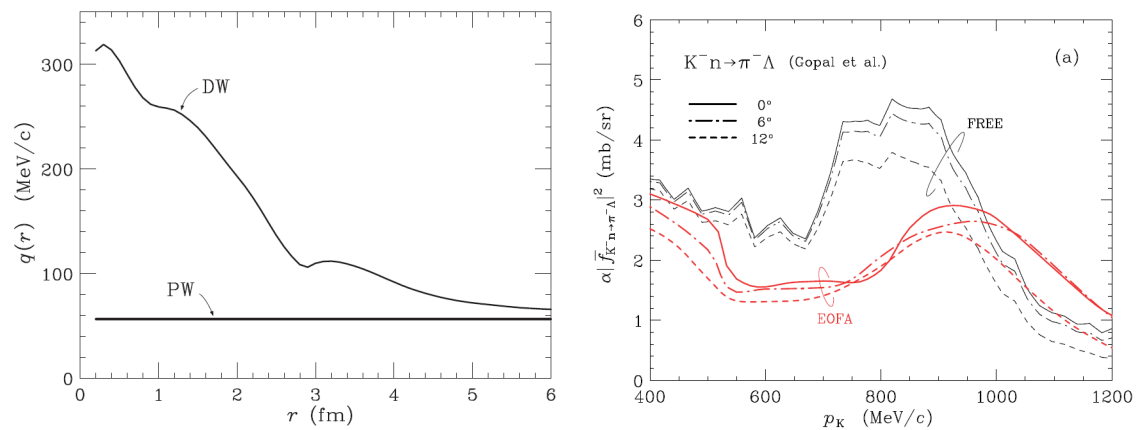


図4 左図: クライン-ゴールドン方程式による歪曲波から求めた局所移行運動量の理論値。右図: EOFA 法による核内での素過程 $K^- n \rightarrow \pi^- \Lambda$ 反応の微分断面積の計算値。Gopal による素過程 $K^- n \rightarrow \pi^- \Lambda$ の散乱振幅を用いた。

(5) $^3_{\Lambda}\text{H}$ を標的核とする (K^-, π^0) 反応に OFA 法を適用して、 $^3_{\Lambda}\text{H}$ の基底状態と励起状態の生成断面積を理論的に求めた。図5に、 $^3_{\Lambda}\text{H}$ 生成と $^4_{\Lambda}\text{H}$ 生成の微分断面積の比の理論値と、 $^3_{\Lambda}\text{H}$ 生成の微分断面積 $\sigma_{lab}(^3_{\Lambda}\text{H})$ と Λ 束縛エネルギー B_{Λ} の関係を示した。その結果、理論値は J-PARC P73 実験での $^3_{\Lambda}\text{H}$ の寿命測定によって得られた実験データに良く一致した。さらに $^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成断面積は Λ 束縛エネルギー B_{Λ} の値に強く依存するため、 $^3_{\Lambda}\text{H}$ の生成断面積の測定によって、 $^3_{\Lambda}\text{H}$ の Λ 束縛エネルギー B_{Λ} を確定するための情報になることが分った。(文献 [5])

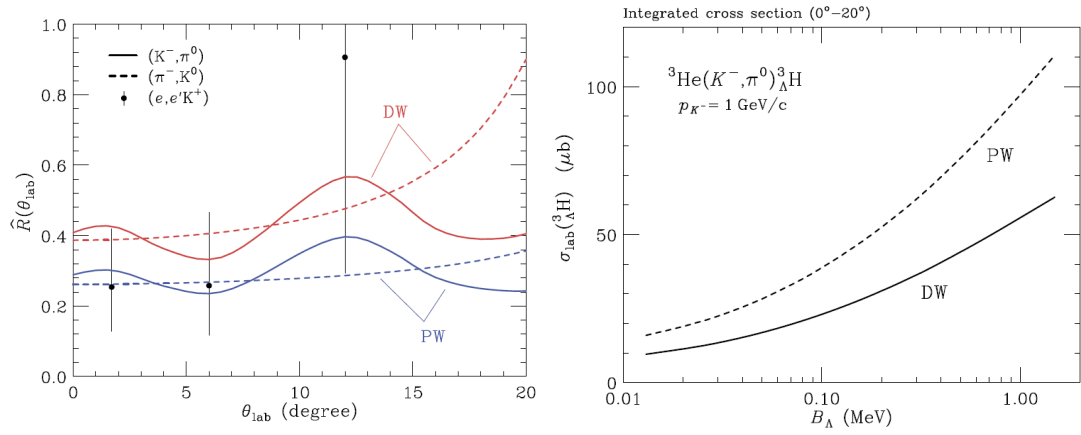


図5 左図： $^3_\Lambda\text{H}$ 生成と $^4_\Lambda\text{H}$ 生成の微分断面積の比 $\sigma_{lab}(^3_\Lambda\text{H})/\sigma_{lab}(^4_\Lambda\text{H})$ の理論値。右図： $^3_\Lambda\text{H}$ 生成の微分断面積 $\sigma_{lab}(^3_\Lambda\text{H})$ と Λ 束縛エネルギー B_Λ の関係。PWは平面波近似，DWは歪曲波近似による理論値を示す。

引用文献

- [1] Toru Harada, Yoshiharu Hirabayashi, Physical Review, **C102** (2020) 024618.
- [2] Toru Harada, Yoshiharu Hirabayashi, Physical Review, **C103** (2021) 024605.
- [3] Toru Harada, Yoshiharu Hirabayashi, Physical Review, **C107** (2023) 054611.
- [4] Toru Harada, Yoshiharu Hirabayashi, Physical Review, **C105** (2022) 064606.
- [5] Toru Harada, Yoshiharu Hirabayashi, Nuclear Physics, **A1015** (2021) 122301.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Harada Toru, Hirabayashi Yoshiharu	4. 巻 107
2. 論文標題 Production spectra with a Sigma- hyperon in (π^- , K^+) reactions on light to heavy nuclei	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054611-1--20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.054611	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 Toru Harada, Yoshiharu Hirabayashi	4. 巻 105
2. 論文標題 Extended optimal Fermi averaging for near-recoilless Lambda production in the (K^- , π^-) reaction on nuclei	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064606-1--7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.105.064606	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 Shigeo Ohkubo, Yoshiharu, Hirabayashi	4. 巻 107
2. 論文標題 Alpha + ^{92}Zr cluster structure in ^{96}Mo	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034317-1--10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.034317	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 Harada Toru, Hirabayashi Yoshiharu	4. 巻 1015
2. 論文標題 Production cross sections of $^3\text{H}_\Lambda$ bound states in $^3\text{He}(K^-, \pi^0)$ reactions at 1 GeV/c	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 122301-1--6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2021.122301	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 Hirabayashi Yoshiharu, Ohkubo Shigeo	4. 巻 2021
2. 論文標題 Existence of core excited $8\text{Be}^* = \alpha + \alpha^*$ cluster structure in $\alpha + \alpha$ scattering	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 113D02-1--11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab126	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 Theingi, Khin Swe Myint, Harada Toru	4. 巻 2319
2. 論文標題 Production of neutron-rich Lambda-hypernuclei with (π^-, K^+) reaction through Sigma-hypernuclear formation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 100005-1--4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037113	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 Harada Toru, Hirabayashi Yoshiharu	4. 巻 103
2. 論文標題 Ξ -nucleus potential for Ξ^- quasifree production in the $9\text{Be}(K^-, K^+)$ reaction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024605-1--8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.024605	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 Harada Toru, Hirabayashi Yoshiharu	4. 巻 102
2. 論文標題 Medium effects on Ξ^- production in the nuclear (K^-, K^+) reaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024618-1--8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.024618	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 Ichinkhorloo Dagvadorj, Aikawa Masayuki, Chiba Satoshi, Hirabayashi Yoshiharu, Kato Kiyoshi	4. 巻 32
2. 論文標題 Analysis of the 160(p, pn)150 reaction using the CDCC method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 010100-1--3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010100	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 -

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 原田融, 平林義治
2. 発表標題 ハイパー核の励起と生成スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原田融, 平林義治
2. 発表標題 ハイパー核生成における中間子歪曲波の効果
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 原田融, 平林義治
2. 発表標題 (K^- , π^-)反応によるによる $^3_4\text{H}_\Lambda$ 生成と最適フェルミ平均
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田融, 平林義治
2. 発表標題 局所運動量移行を考慮した核内T行列の最適フェルミ平均
3. 学会等名 日本物理学会第77回年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田融, 平林義治
2. 発表標題 (K-, K+)反応によるXi-生成スペクトルと媒質効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田融, 平林義治
2. 発表標題 (K-, K+)反応によるXiハイパー核生成スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	平林 義治 (Hirabayashi Yoshiharu) (60271714)	北海道大学・情報基盤センター・准教授 (10101)	

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
---------	---------