

令和 3 年 3 月 15 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860252

氏 名 池野 なつ美

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： バレンシア大学 （国名： スペイン ）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

原子核中における中間子と強い相互作用の対称性

3. 派遣期間：平成 31 年 2 月 25 日 ～ 令和 3 年 2 月 21 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名： バレンシア大学

部局名： IFIC

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意(A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入也可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

現代のハドロン原子核物理学において、強い相互作用の基礎理論（量子色力学 QCD）から原子核を含むハドロン多体系のダイナミクスを理解することは重要である。本研究では、中間子-原子核系（中間子原子・原子核、原子核衝突の中間子生成など）における中間子を通して、強い相互作用のもつ対称性と核物質の性質（対称エネルギーの振る舞い）の情報を引き出すことを目的とした。その際、QCD 基礎論を基に原子核中での中間子の性質や相互作用を記述する有効理論を構築・拡張した上で、中間子-原子核系に適用することによって、QCD から原子核を含むハドロン多体系のダイナミクスまで、つまり、基礎理論から実験データまでを明確に結びつけて理解することを目指した。

まず受け入れ先研究者がこれまで発展させてきた、カイラル対称性に基づくチャンネル結合法（カイラルユニタリー模型）を用いて、下記のような種々のハドロン反応やハドロン共鳴の研究を行った。

χ_{c1} 粒子が崩壊し、擬スカラー中間子 η (η^0 , K^0) と $f_0(1370)$, $f_0(1710)$, $f_2'(1270)$, $f_2'(1525)$, $K_2^*(1430)$ 共鳴のいずれかの粒子に崩壊する比を、カイラルユニタリー模型を用いて評価した。終状態の共鳴状態は、ベクトル中間子同士の相互作用によって、動力学的に共鳴状態を生成し、これらの共鳴状態が中間子の分子状態として生成される理論を用いた。実験データとして存在する分岐比を再現した上で、他の崩壊比の割合についても予測した。今後更なる実験が進むことによって、これらの共鳴状態の性質を理解することが可能な有益な結果が得られた。[N. Ikeno, J. M. Dias, W.H. Liang, E. Oset, “ χ_{c1} decays into a pseudoscalar meson and a vector-vector molecule”]

Phys. Rev. D100, 114011 (2019).]

B 中間子のセミレプトニック崩壊反応($B \rightarrow D \nu_\ell \ell(\nu_\tau \tau)$)について、始状態の B 中間子と終状態の D 中間子間に働く相互作用の効果を評価した。[N. Ikeno, L. Dai, E. Oset, “Meson exchange between initial and final state and the R_D ratio in the $\bar{B} \rightarrow D \bar{\nu} \ell$ reactions”, Eur. Phys. J. A56, (2020).]

中間子 ϕ (4040)、 ϕ (4160) 生成領域において、電子・陽電子反応によって生成された $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ 実験データについて、 ϕ (4040) と ϕ (4160) の崩壊チャンネルとして $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ を考慮し、カイラルユニタリー模型を用いて記述することを行った。さらにこの手法を、重いクォークを含んだ B 中間子の系に適用した。 $Y(n1)$ が、 $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ に崩壊する理論模型である。 $Y(n1)$ の研究は、これまでクォーク模型によって精力的に研究が行われてきたが、分子模型によっても、存在する $Y(4s)$ 状態の実験データを再現できることを示した。[M. Bayar, N. Ikeno, and E. Oset, “Analysis of the $\psi(4040)$ and $\psi(4160)$ decay into $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$, $D_s^{(*)}\bar{D}_s^{(*)}$ ”, Eur. Phys. J. C80, 222 (2020); W.H. Liang, N. Ikeno, E. Oset, “ $\Upsilon(n1)$ decay into $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ ”, Phys. Lett. B803, 135340 (2020).]

2018 年に Belle 実験で初めて $\Omega(2012)$ が観測されて以降、 $\Omega(2012)$ についてクォーク模型と分子模型に基づく理論計算が盛んに行われてきた。その後 2019 年に、Belle が分子描像を否定するような新しい解析結果(分岐比)を出されたため、本研究では以前の研究に使われたカイラルユニタリー模型を用いて再解析を行った。本模型では、 $K^- \Xi^*$, $\eta \Omega$ (s 波), $K^- \Xi$ (d 波) チャンネルの相互作用を考慮した。s 波ポテンシャルはカイラル摂動論から決めたものを用い、d 波ポテンシャルはパラメータを導入して、 $\Omega(2012)$ の共鳴状態を動力学に生成した。実験データを再現するようにパラメータを決め、その結果、最近の Belle 実験を含むすべてのデータが、考慮したチャンネルの中間子-バリオン相互作用に起因する分子描像と一致することがわかった。[N. Ikeno, G. Toledo, E. Oset, “Molecular picture for the $\Omega(2012)$ revisited”, Phys. Rev. D 101, 094016(2020).]

2020 年には BESIII 実験で、 $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^* D^0 + D_s D^{*0})$ 反応によって、新しい $Z_{cs}(3985)$ 状態が報告された。これは、 $D_s^* D^0$, $D_s D^{*0}$ の閾値より約 7MeV 上の状態として存在し、また $Z_c(3900)$ 状態の u または d クォークが s クォークに置き換えられた SU(3) パートナーであると示唆された。この $Z_{cs}(3985)$ の解釈として、テトラクォーク状態、分子状態、閾値効果などが、既に他の理論的研究により議論されていた。本研究では、 $Z_c(3900)$ 状態の研究を参考にし、 $D_s^- D^*$ と $J/\psi K^-$, $K^* \eta_c$, $D_s^- D^{*0}$, $D^* s D^0$ の結合チャンネルの相互作用を用いて Z_{cs} について研究した。この相互作用は、束縛状態や共鳴を起こすほど強くはなかったが、生成反応の閾値で閾値効果を起こすのには十分であり、その結果実験で得られた断面積と振る舞いと一致することを示した。[N. Ikeno, R. Molina, E. Oset, “The $Z_{cs}(3985)$ as a threshold effect from the $\bar{D}_s^* D + \bar{D}_s D^*$ interaction”, Phys. Lett. B814, 136120 (2021).]

D 中間子からの 3 体崩壊反応が実験で多く観測されている。本研究では、 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$, $D^+ \rightarrow \pi^+ \eta \eta$ および $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$ 反応について注目した。終状態の 2 つ中間子の相互作用を考慮することによって、カイラルユニタリー模型では $a_0(980)$ や κ ($K_0(700)$) 共鳴状態等を生成することができるため、共鳴状態がこれらの反応でどのように表れるかを調べた。 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$ 反応については、Belle 実験で、 $K\pi$, $\pi\eta$, $K\eta$ の不変質量分布が観測されているため、実験結果と比較した。 $a_0(980)$ は、 $\pi\eta$, $\bar{K}K$ のチャンネル結合によって生成されるため、不変質量分布においても実験データを再現することができることが分かった。しかし、他の共鳴状態や P 波との干渉も影響すること明らかになり、 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$ 反応から共鳴状態の情報を引き出すことは難しいことが明らかになった。一方、 $D^+ \rightarrow \pi^+ \eta \eta$ および $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$ 反応については、他の共鳴状態が生成されず、純粹に $a_0(980)$ のビ

ークをみることができると思われる。これら2つの反応は、分岐比のみ実験で観測されているため、理論模型において存在するパラメータを、実験で観測された分岐比を再現するように決めた。その結果、パラメータによる質量分布の形の振る舞いの不定性は大きいものの、 $a_0(980)$ ピークは明確にみることができることが分かった。 $a_0(980)$ 生成の反応メカニズムに対する情報を得るためにも、実験的に質量分布を測定することは重要であると思われる。[G. Toledo, N. Ikeno, E. Oset, "Theoretical study of the $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$ reaction", Eur. Phys. J. C (2021). (accepted March17) [arXiv:2008.11312 [hep-ph]; N. Ikeno, M. Bayar, E. Oset, "Combined theoretical study of the $D^+ \rightarrow \pi^+ \eta$ and $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$ reactions", [arXiv:2102.01650 [hep-ph]]

$np \rightarrow \pi^+ \pi^- d$ 反応を説明するために、連続的に生じる中間子生成 $np \rightarrow \pi^- pp$, $pp \rightarrow \pi^+ \pi^- d$ 反応を提案し理論的に研究を行った。アイソスピン $I=0$ の $np \rightarrow \pi^+ \pi^- d$ 反応において観測された狭いピーク構造は、これまでダイバリオン $d^*(2380)$ のピークに対応すると思われていた。本研究では、2つの反応を考慮することで、 $d^*(2380)$ を理論的に導入する必要なく、実験で観測されたピークの位置や幅を再現できることを示した。 $pp \rightarrow \pi^+ d$ 反応については、反応のピークの位置と断面積の大きな強度を決定する三角形の特異点 (Triangle singularity: TS) によって引き起こされることを用いた。この $pp \rightarrow \pi^+ d$ 反応は、昔から研究されていたが、本研究では、反応過程で生じる TS で記述できることを明らかにした。 $pp \rightarrow \Delta(1232)N$ 反応後に、 $\Delta(1232) \rightarrow \pi N'$ 崩壊が生じ、生成した N' と N と核融合反応によって重陽子が得られるという $pp \rightarrow \pi^+ d$ 反応のモデルを構築した。[R. Molina, N. Ikeno, E. Oset, "Sequential single pion production explaining the dibaryon $d^*(2380)$ peak", [arXiv:2102.05575 [nucl-th]]; N. Ikeno, R. Molina, E. Oset, "Triangle singularity mechanism for the $pp \rightarrow \pi^+ d$ fusion reaction", [arXiv:2103.01712 [nucl-th]].

中間子-原子核系の新しい系として、負電荷を帯びた2つの π^- 中間子が原子軌道に結合しているダブル π 中間子原子の構造を理論的に研究した。ダブル π 中間子原子は、multi bosonic 系の観点から興味深い系であると考えられる。また、アイソスピン $I=2$ の $\pi\pi$ 相互作用や π 中間子-原子核間の強い相互作用に関する貴重な情報を得ることができると期待した。本研究では、 $\pi\pi$ 強い相互作用と電磁気相互作用を考慮し、重い原子核中のダブル π 中間子原子について、摂動論により束縛エネルギーへの影響を評価した。 $\pi\pi$ 相互作用によるエネルギーシフトの大きさのオーダーは、基底状態の場合、強い相互作用では 10keV 程度、電磁的相互作用では 100keV 程度であることを明らかにした。[A. Tani, N. Ikeno, D. Jido, H. Nagahiro, H. Fujioka, K. Itahashi, S. Hirenzaki, "Structure of double pionic atoms", Prog. Theor. Exp. Phys. 2021年2月掲載決定]

原子核衝突反応における中間子生成の研究も推進した。重イオン衝突において生成された π 中間子を通して、核物質の性質 (対称エネルギーの振る舞い) を探ることを目的とした。中性子過剰な原子核衝突によって生成された荷電 π 中間子比 (π^-/π^+) が、高密度領域の対称エネルギーに敏感であると提案され、2016年に理研 RIBF で $\text{Sn}+\text{Sn}$ 衝突実験が行われたことから、特に π 中間子生成に着目した。生成された π 中間子と状態方程式を結びつけるためには、核反応の時間発展を正しく解く理論 (輸送模型) が必要であり、実験結果から十分な研究成果を引き出すためにも、信頼できる理論模型を用いた計算が求められている。本研究では、反対称化分子動力学 (AMD) 法と、反応過程における Δ 粒子や π 中間子などの運動を実験データに基づいて記述する微視的輸送模型 (JAM) を連動させた輸送模型 (AMD+JAM) を使い、この模型を拡張・改良して、信頼度を向上させることを行った。

信頼度の高い理論模型を得るために、国際共同研究(Transport Model Evaluation Project: TMEP)に参加し、多数の輸送理論コードの結果を比較する研究を進めた。他の理論結果との相違を理解し、本模型を改良することを試みた。現時点では、実際の反応よりも比較しやすい理想的な箱計算(周期的境界条件を課した箱の中の多核子系)し、他の輸送模型の結果と比較することによって、本模型の信頼性を確認した。[A. Ono et al., (共著者) “Comparison of heavy-ion transport simulations: Collision integral with pions and Δ resonances in a box”, Phys. Rev. C100, 044617, (2019).]

重イオン衝突では、反応過程において Δ 生成・吸収($NN \leftrightarrow N\Delta$)や π 中間子生成($\Delta \rightarrow N\pi$)反応などが生じる。輸送模型でこれらの反応について、核子に対するパウリブロッキングが、終状態の π 中間子生成数や荷電 π 中間子比に影響を及ぼすことを明らかにした。パウリブロッキングの取り扱いによる影響を定量的に議論し、 π 中間子生成の実験データを正しく理解するための重要な要因の一つであることを示した。本輸送模型(AMD+JAM)では、このパウリブロッキングによる不定性を取り除いて模型を改良した。[N. Ikeno, A. Ono, Y. Nara, A. Ohnishi, “Pauli blocking effects on pion production in central collisions of neutron-rich nuclei”, Phys. Rev. C 101, 034607 (2020) を出版. 9th International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM2019), September 30– October4, 2019, Danang City (Vietnam); High-density symmetry energy and pion production in heavy-ion collisions”, Gordon Research Conference, June 16 –21, 2019, Colby-Sawyer College, New London, NH, US; Pion production within AMD+JAM approach”, Challenges to Transport Theory for Heavy Ion Collisions, May 20–24, 2019, ECT*, Trento において成果を発表]

理研 RIBF での Sn+Sn 衝突実験(Spirit)について、本模型を使って計算した理論結果を実験研究者に提供し、実験データの解釈のプロジェクトに参加した。上記の研究によって、改良した輸送模型を使って計算を行ったが、実験で得られた荷電 π 中間子数や比を比べると、理論結果の方が少なく、まだ十分に再現できていないことが分かった。この傾向は、他の輸送模型についても同様に見られ、実験データから対称性エネルギーに関する制約を抽出することは現時点では困難であり、理論側の更なる改良が必要であることが結論付けられた。[G. Jhang et al. SpiRIT and TMEP Collaborations(共著者), “Symmetry energy investigation with pion production from Sn+Sn systems,” Phys. Lett. B813, 136016 (2021).]

そこで、この課題を解決するために、ポテンシャルの影響について研究を進めた。上記の Spirit 実験データと比較した輸送模型では、 π 中間子や Δ 共鳴のポテンシャルを考慮していないモデルであったため、これらを考慮するようにコードの改良を行った。その結果、反応途中に生成される Δ や終状態の π 中間子生成数や比が、ポテンシャルの有無に大きく影響することが分かってきた。他の論文等で既に議論された Δ 共鳴や π 中間子生成を記述するポテンシャル等も考慮し、Spirit 実験結果を再現する理論模型について、受け入れ先研究者とも議論し助言をもらい、現在、計算を進めている。ポテンシャルを考慮した改善された本模型によって、今後実験データから核物質の性質や対称エネルギーの振る舞いの情報を引き出すことができると期待している。現在、実験グループ Spirit や TMEP のミーティングにも参加し、実験データ解析の把握や情報交換も進めている。