

受け継がれるストレンジネス物理の伝統と未来

京都大学大学院理学研究科 原子核・ハドロン物理研究室
後神 利志 (講師)

Inherited Traditions and the Future of Strangeness Physics
Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University.
Toshiyuki Gogami (Senior Lecturer/Junior Associate Professor)

原ハド (原子核・ハドロン物理研究室) は、今井教授、永江教授の時代から長きにわたり、ストレンジネス量子数を持つ系のハドロン・原子核物理研究で世界的な潮流を生み出してきた。2024 年 3 月、核物理委員長や日本物理学会会長も務めた分野の世界的重鎮、永江教授が定年退職された。京大のストレンジネス物理研究の弱体化が懸念される中、2023 年 4 月の成木准教授の教授昇進、2025 年 4 月の関口教授着任により、2 教授体制の強固な「新・原ハド」が誕生した。この両教授をリーダーとし、スタッフ陣 (銭廣准教授、堂園助教、富田助教) の強力な支援のもと、私 (後神：2018.1—2025.1 助教、2025.2～ 講師) を中心として、原ハドの伝統とも言うべきストレンジネス物理の研究を力強く継続させることができた。

永江教授の退職後、新たに「京都大学ストレンジネス核物理研究グループ (KS グループ)」と銘打ち、日本・J-PARC と米国・ジェファーソン研究所 (JLab) という世界的先端加速器施設でのユニークな研究を 2 本柱として推進してきた。J-PARC では、私が永江特推のポスドク時代 (2014.7—2016.3) から開発に従事してきた新分光器「S-2S」を用い、2025 年前期に待望の初物理データ取得 (E70 実験) を実現した。現在、原田 (D3) と江端 (D3) が博論に向け鋭意データ解析中である。今後、採択済みの E63、E75-1、E94、E90 実験に加え、S-2S を軸とした新たな物理プログラムが展開される未来が開けた。

特筆すべきは、私が代表を務める J-PARC E94 実験である。2022 年の Stage 1 採択を経て、今年度ついに Stage 2 採択を獲得した。これは同実験を修論テーマとした東北大・渡辺大護氏 (D2) や谷口 (M2) の献身的な努力によるところが大きい。また、本稿執筆中に私と共に JLab に滞在中の石戸 (M1) は、JLab において 2028 年開始予定の史上最大規模のハイパー核分光実験 (後神が代表である JLab E12-24-004 実験等の一連のプロジェクト) の準備を着実に進めてくれている。修士で JLab、博士で J-PARC におけるプロジェクトに取り組む岩本 (D1) の広い見識によるチームへの貢献も頼もしい。

今や KS グループは、学生が主体的に運営する頼もしいチームへと成長した。私自身は 2026 年 3 月に京大を辞し、4 月より滋賀大学 (准教授) へ着任するが、グループとの歩みはこれからも続く。KS グループの研究資金獲得や在籍学生の学位取得に向けたサポート、さらには京大教員と連携した新規学生の委託指導などを通じ、今後も微力ながらチームの基盤を後方から支えていく所存である。次世代が力強く牽引する KS グループのさらなる発展が、今から楽しみでならない。

J-PARC E70/E75 における Λ ・ Ξ ハイパー核分光

京都大学大学院理学研究科 原子核・ハドロン物理研究室
江端 健悟 (博士 3 年)

Λ and Ξ Hypernuclear Spectroscopy in J-PARC E70 and E75
Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University.
Kengo Ebata (D3)

ストレンジネス自由度 (S) を含むバリオン間相互作用、すなわちハイペロン-核子 (YN) およびハイペロン-ハイペロン (YY) 間相互作用は、フレーバーSU(3) 対称性の枠組みにおいて核力の自然な拡張として捉えることができる。これらを究明することは、バリオン間力のより普遍的な理解へと繋がる。さらに、中性子星内部の高密度環境下にはハイペロンが出現する可能性が指摘されており、YN・YY 相互作用は中性子星の内部構造を理解する上で不可欠な基礎情報として位置づけられている。

2023 年、J-PARC ハドロン実験施設・K1.8 ビームラインに、京大グループが主導して設計・開発した高分解能磁気スペクトロメータ S-2S がインストールされた。2 度のコミッションランを経て検出器の基礎性能を確立したのち、今年度 5 月に初の物理データとなる Ξ ハイパー核の欠損質量分光 (J-PARC E70 実験) のデータ取得を完了した。私は本国際共同研究の主要メンバーとして、分光器の建設からデータ取得まで中核的な役割を担ってきた。E70 実験における主要な物理チャンネルは $^{12}\text{C}(K^-, K^+)^{12}_{\Lambda}\text{Be}$ 反応であるが、エネルギー校正用に $p_{\pi^+} = 1.6, 1.8 \text{ GeV}/c$ における $^{12}\text{C}(\pi^+, K^+)^{12}_{\Lambda}\text{C}$ 反応のデータも取得した。私は現在、この新たなビーム運動量領域における $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の s_{Λ} 、 p_{Λ} 軌道状態の生成断面積、および準自由 Λ 生成事象のスペクトラム形状解析を博士論文のテーマとして進めている。これらの解析を通じ、 Λ ハイパー核の生成メカニズムや ΛN 相互作用に関する新たな知見を導出する。

また、S-2S スペクトロメータの運動量解析パラメータの最適化も推し進めている。3 次元有限要素法を用いた静磁場計算ソフト TOSCA のモデル修正等により、 Ξ ハイパー核の分光性能として現在 3 MeV (FWHM) の分解能を達成している。今後は、機械学習 (AI) を用いた運動量再構成アルゴリズムなども積極的に取り入れ、設計分解能である 2 MeV (FWHM) の実現を目指す。

さらに、計画する $A=7$ 体系の Ξ ハイパー核 $^7_{\Xi}\text{H}$ の分光実験 (J-PARC E75 実験) の準備にも並行して尽力した。本実験では $1.6 \times 10^6/\text{spill}$ (1 spill = 4.2 sec) という大強度 K^- ビームを使用するため、同時に混入する背景 π^- の高レート環境を考慮し、既存のマルチワイヤドリフトチェンバー (SDC1) およびビーム粒子識別用エアロゲルチェレンコフ検出器 (BAC) の改良が不可欠である。そこで、より高レート耐性を持つチェンバーを SDC1 として導入・整備するとともに、新たな BAC の開発・設計を行った。開発した新 BAC は、次回のビームタイムにて性能評価を進める予定である。

J-PARC E75 実験とその準備

京都大学大学院理学研究科 原子核・ハドロン物理研究室
岩本 哲平 (博士 1 年)

Development of Aerogel Cerenkov counter for J-PARC E75 experiment
Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University.
Tepei Iwamoto (D1)

本年度より J-PARCK1.8 ビームラインでの活動を開始した。同ビームラインでは今年度、高分解能スペクトロメータ S-2S を用いた E70 実験が遂行された。私が取り組む J-PARC E75 Phase 1 実験 (E75-1) は、E70 に続く Ξ ハイパー核分光研究である。本計画は同グループの江端氏 (D3) が博論テーマ候補として進めてきたものだが、同氏が E70 データの解析に専念することとなり、私が引き継いで主導している。S = -2 の物理領域では近年、フェムトスコーピーやエマルジョン実験が成果を出し始めており、本実験への期待も高い。

J-PARC E75-1 実験では、 (K^-, K^+) 反応を用いて Ξ ハイパー核 ${}^7_{\Xi}\text{H}$ (${}^6\text{He} + \Xi^-$) を欠損質量法で分光する。 ${}^7_{\Xi}\text{H}$ における Ξ^- 粒子は、中性子ハロー核である ${}^6\text{He}$ の 0s 軌道に束縛されると予想されている。理論計算によれば、 ${}^7_{\Xi}\text{H}$ の密度分布は α クラスタ、 Ξ^- 、2 つのハロー中性子の三層構造を形成し、 Ξ -n 間の距離はおよそ 4 fm になる。これは Ξ N 相互作用の有効半径より十分に大きいため、 ${}^7_{\Xi}\text{H}$ の束縛エネルギーには $\Xi\alpha$ 相互作用、すなわち Ξ N 相互作用における中心ポテンシャルが支配的に寄与する。つまり本測定は、 Ξ N 相互作用の中心力成分を決定づける極めて有効なアプローチである。

E75-1 実験の課題として、当初使用予定であったビーム用エアロゲルチェレンコフ検出器 (BAC) が、本番の想定ビームレート下で検出効率を低下させる懸念があった。そこで今年度は、高ビームレート環境でも十分な性能を発揮する BAC 試作機の開発および試験を行った。現在、2025 年 11 月に取得したデータの解析から性能評価を進めている。2026 年 12 月に予定されているビームタイムに向けて実機を完成させる計画である。

研究発表にも精力的に取り組んだ。国際会議 HADRON2025 (2025 年 3 月 27-31 日、大阪大学) にてポスター発表を行い、プロシーディングスが先日公開された [T. Iwamoto et al., “Development of a Trigger System for Lambda Hypernuclear Spectroscopy at Jefferson Lab”, PoS (HADRON2025) 261 (2026); <https://doi.org/10.22323/1.500.0261>]. また、国際スクール SNP School 2025 (2025 年 12 月 1-5 日、RCNP) では口頭発表を行った。さらに、理学共創イノベーションコンソーシアム (2026 年 2 月 13 日、京都大学) での発表を通じ、分野外の学生・研究者との交流から研究者としての視野を広げることができた。今後も研究を推進するとともに、他者に的確に伝えるプレゼンテーション能力に磨きをかけていきたい。

J-PARC E94 アクリルチェレンコフ検出器の開発

京都大学大学院理学研究科 原子核・ハドロン物理研究室
谷口 智大 (修士 2 年)

Development of Acrylic Cherenkov Counters for J-PARC E94 Experiment
Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University.
Tomohiro Taniguchi (M2)

日本・J-PARC で実施予定の E94 実験では、新分光器 S-2S を用いて特殊な原子核である「ハイパー核」を高精度で生成・分光し、ハイペロン-核子間における荷電対称性の破れに関する新たな知見を得ることを目指している。本年度、私は (π^+, K^+) 反応を用いる E94 実験において、信号である K^+ の測定感度を高めるための新しいチェレンコフ検出器の開発に修論研究として従事した。

我々の身の回りにある通常の原子核は、u, d クォークから成る陽子と中性子のみで構成される。一方、ハイパー核は、構成粒子に s クォークを含むバリオン (ハイペロン) を内包する原子核である。私が所属する京大ストレンジネス核物理研究グループでは、このハイパー核を世界最高レベルの精度で分光することで、自然界の基本相互作用の一つである「強い相互作用」の理解を、s クォークを含む系へと拡張することを目指している。ハイパー核は自然界には存在しないため、加速器を用いた高エネルギー反応により人工的に生成して分光する。ハイパー核の生成は稀な事象であるため、背景事象をいかに抑えるかが研究実現の鍵となる。私は、背景事象粒子を除去し、信号・ノイズ比 (S/N) を向上させるための新アクリルチェレンコフ検出器 (UV Transmissive Acrylic Cherenkov Counter; UC) の開発を主導した。

2025 年 11 月、J-PARC において Λ ハイパー核のガンマ線分光による $A=4$ 系の荷電対称性の破れ研究 (E63 実験) のコミッショニングと物理データの一部取得が行われ、私も準備とビームタイムに参加した。このビームタイムにおいて、UC 試作機を S-2S 最下流に設置し性能を試験する機会を得た。K1.8 ビームラインが供給する π^- ・反陽子ビームを UC 試作機に照射し、照射位置、角度、およびレートへの依存性を評価することが目的である。

(1) アクリル+全面鏡面処理、(2) アクリル+4 面粗面処理 (#400)、(3) UVT アクリル (Acrylite#001) +全面鏡面処理、という 3 つの候補材料を比較検証した。その結果、(3) の構成においてアクリルに接続する 2 本の PMT 信号の和を取ることで、想定される運動量・照射位置・角度範囲の信号粒子に対し、99%以上の高検出効率を有することが確認された。今後、2026 年夏までには UC 検出器の量産および架台の設計・組み立てを進め、既存の水チェレンコフ検出器と置き換える形で、J-PARC E94 実験の遂行に備える予定である。

JLab におけるハイパー核物理研究の標的システム開発

京都大学大学院理学研究科 原子核・ハドロン物理研究室
石戸 景 (修士 1 年)

Target-system development for future hypernuclear experiments at JLab
Department of Physics, Graduate School of Science, Kyoto University.
Kei Ishido (M1)

4 月から 6 月までは、施設見学や研究室の活動紹介を受けることが主であった。本格的な研究活動は、京大ストレンジネス核物理グループ (KS グループ) に配属された 7 月下旬から始まった。同グループの研究は、J-PARC でのハドロンビーム実験と米国・ジェファーソン研究所 (JLab) での電子ビーム実験に大別される。私は J-PARC E94 実験用アクリルチェレンコフ検出器の試験に携わりつつ、JLab での研究を主軸に据えることを決心した。配属後は、2028 年春に JLab 実験ホール C で開始予定の史上最大規模のハイパー核精密分光実験に向け、実験標的システムの開発に注力している。

本実験では、JLab の大強度電子ビームを用いた ($e, e'K^+$) 反応によりラムダ (Λ) ハイパー核を生成し、その束縛エネルギーを精密に測定する (JLab E12-24-004 実験等)。軽質量から重質量 ($A=6\text{---}208$) におよぶ広範囲の同位体濃縮標的を用いた包括的な測定である。標的システムには、遠隔駆動系や真空散乱槽を含むコンパクトな構造と、大強度ビームの連続照射に伴う標的の熱変質を防ぐ冷却系の設計が求められる。開発にあたり、私は Geant4 ベースのモンテカルロシミュレーションで標的内の発熱量を評価し、その値を入力として ANSYS による三次元有限要素法を用いた熱伝導シミュレーションを簡易モデルで実施した。2026 年 2 月 12—13 日のコラボレーション会議では、この結果を JLab の国際共同研究者と共有した。JLab における標的・エンジニアグループとの議論を通じて今後の戦略を練り、具体的な開発方針を定めることができた。本会議での報告は、2025 年 12 月の SNP School 2025 (大阪大) に続く 2 回目の英語発表の場となり、研究者として研鑽を積む貴重な機会となった。

10 月からは、C++/Python を用いた分光スペクトルのシミュレーションコード開発に着手し、標的起因のエネルギー系統誤差や背景事象の見積もりも進めている。本稿執筆中の現在は指導教員・後神氏と共に JLab に滞在しており、実験に向けた検出器の性能試験やビーム位置モニターの整備等に従事しつつ、国際共同研究の主要メンバーとして次世代ハイパー核実験の準備を進めている。

今年度の残りの活動としては、M1 交流会でのポスター発表および日本物理学会春季大会でのオンライン発表を控えており、現在その準備を急ピッチで進めている。