

2020 年度 公募研究 活動報告

【A02 班「クォーククラスターで読み解くクォーク・ハドロン階層構造」関連】

名古屋大学 特任助教 加藤悠司

研究課題:「チャームバリオン内のダイクォーク構造の探求」

本公募研究では、Belle 実験で取得されたデータを用いて、チャームバリオンに関する研究を行った。

本研究で最も重要な成果は $\Xi_c(2970)$ という既知のバリオンのスピン・パリティの決定である (出版論文リスト 2)。

$\Xi_c(2970)$ の崩壊角分布および崩壊分岐比より $J^P=1/2^+$ と決定した。これは Roper と呼ばれる核子の励起状態 $N(1440)$ と同じ量子数である。Roper はクォークモデルの予言に比べて質量が軽すぎる事が知られており、謎が多いはどろんである。今回の結果から、 $1/2^+$ の励起エネルギーがフレーバによらずにほぼ 500 MeV であることが明らかになった。ここから、Roper に関する理解がより進むと期待できる。

また、基底状態の Λ_c が $\Lambda \eta \pi$ に崩壊するモードを詳細に解析し、 $\Lambda(1670)$ が $\Lambda \eta$ に崩壊するものが多く含まれることを明らかにした (出版論文リスト 1)。 $\Lambda(1670)$ は、今まで部分波解析でのみ観測されていた状態だが、今回初めてはっきりとしたピーク構造の観測に成功し、また質量や幅の測定も行うことに成功した。

大阪大学 助教 白鳥昂太郎

「オメガバリオン分光実験のための大強度ビーム測定用タイミング検出器の開発」

大強度ビーム測定用の精細セグメントのチェレンコフタイミング検出器を開発し、J-PARC 高運動量ビームラインにおいて 100 MHz の大強度ビームを使用したオメガバリオンの研究を開拓する。本年度は、Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)の信号処理用の高速オペアンプを使用した整形回路の出力信号処理法を開発した。整形回路の出力信号後のリングング抑制用にショットキーバリアダイオードを利用した試作フィルター回路を製作した。加えて、出力信号の幅を測定することで信号の time walk 補正を行うための信号整形を行う試作回路を製作した。実機と同じ 3 mm 幅の輻射体と整形回路、試作フィルター回路を使用し、J-PARC 高運動量ビームラインで想定される強度と同じ大強度ビームによる検出器要素の評価試験を、東北大学電子光理学研究センターで実施した。想定される 3 MHz の計数率の条件において、低レート環境と同じ 50 ps (σ) の時間分解能の性能を得ることができ、信号処理方法を確立した。更なる大強度を目指した 0.3 mm 幅の輻射体を用いた検出器を評価し、3 mm 幅と同じ時間分解能を達成した。狭い幅の輻射体の製作技術の確立、信号処理法の開発を完了し、大強度ビーム測定用の精細セグメントのチェレンコフタイミング検出器の測定器技術を確立した。

奈良女子大学 教授 宮林謙吉

「擬スカラーチャーモニウムへの輻射崩壊による新ハドロンの探索」

エキゾチックなチャーモニウム似粒子である $X(3872)$ の構造について探求するため、そのパートナー粒子の探索を行った。 $X(3872)$ はスピン(J)、パリティ(P)、荷電共役(C)なる量子数 $JPC=1^{++}$ をもち、この量子数を持つ未確認のチャーモニウム $c\bar{c}(2P)$ と $DD^*(-)$ と $D(-)D^*$ の対称な重ね合わせのメソン分子が混合した状態とする解釈が妥当と考えられている。この描像では、C の符号が反転した $JPC=1^{+-}$ を持つ C-odd パートナー粒子の存在が予見される。この状態は hc メソンとメソン分子が混合し、 $c\bar{c}$ への輻射崩壊が有力な崩壊モードになる。 $B0 \rightarrow c\bar{c} K^{\pm}$ なる B メソンの多体崩壊で、中間状態が $hc \rightarrow c\bar{c}$ であった場合は $c\bar{c}$ 不変質量スペクトラムの該当する値のところにピークが形成されるので、この手法の感度を見積もった。主たるバックグラウンドは B メソン対生成以外のコンティニウムと呼ばれるハドロ生成事象であり、事象の形状を記述する 30 個の変数を FastBDT なる多変量解析アルゴリズムで処理して信号らしさの出力値 0.25 以上を要求すると、コンティニウムバックグラウンド事象を一桁低減できることがわかった。これにもとづいてモンテカルロシミュレーションを用いた模擬実験を行い、Belle II 実験が最終目標とする 50fb^{-1} の実験データを蓄積した際には $c\bar{c}$ を $KS K^{\pm}$ と $pp(-)$ のいずれの崩壊モードで再構成した場合も有意に信号を見いだせる見込みであることを示した。並行して、二光子衝突で片方が仮想光子である場合には $JPC=1^{++}$ を持つ $X(3872)$ の生成が起こり得ることがわかった。

東北大学 助教 石川貴嗣

「光子ビームを使った ηN 散乱長の精密測定による核子共鳴 $N(1535) S_{11}$ の研究」

核子共鳴 $N(1535) 1/2^-$ は核子 N のカイラルパートナーの候補とされるが、その構造についてはよくわかっていない。 $N(1535)$ は η メソンと N に崩壊しやすいため、 $N(1535)$ の性質を明らかにするには低エネルギー ηN 散乱の情報が必要である。本研究では、 η と中性子 (n) の散乱の寄与を露わに含む最適な運動学で、重陽子 (d) 標的での η メソン光生成反応の微分断面積を測定し、 ηn 散乱長すなわち ηN 散乱長を精密に決定する。これにより自由空間での $N(1535)$ の構造、カイラル凝縮に伴う質量増加なのか、 η と N のハドロクラスタの分子状態なのか、の解明を目指す。

東北大学電子光理学研究センター ELPH の光子ビームラインで 電磁カロリメータ FOREST と前方スペクトロメータ BLC を使って、陽子 (p) を 0° で検出した 940 MeV 程度の光子ビームでの $\gamma d \rightarrow p\eta n$ 反応での ηn 不変質量に対する微分断面積を測定した。実験遂行により統計量を増やすとともに、データ解析を継続的に行った。水素標的における $\gamma p \rightarrow \eta p$ と $\gamma d \rightarrow \pi^0 p$ 反応のイベントで BLC スペクトロメータの運動量の較正を行い、重水素標的データでのプリミナリーな ηn 不変質量分布を得た。

その他、低エネルギー ωN 散乱長を $\gamma p \rightarrow \omega p$ 反応で決定し、学術論文にまとめた。 $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応の解析で ηd 系でのアイソスカラーなダイバリオンピークを見出し、質量と幅、スピンパリティを与えた。さらに ηd 散乱長の導出も行った。これらを 2 つの学術論文にまとめ、letter は投稿中、full paper は近日中に投稿予定である。

【B01 班「ストレンジ・ハドロンクラスターで探る物質の階層構造」関連】

岐阜大学 教授 仲澤和馬

「少数多体ハイパー核大規模解析のためのエマルジョン全面探査法の高効率・高速化」

最終年度の2年目は、エネルギー較正のための α 崩壊を、機械学習させた探査システムで高速・高効率に検出することが第1目標であった。トリウム系列の ^{228}Th からスタートする5つの α 線を伴う事象を Geant4 で発生させ、画風変換技術によりエマルジョン中の崩壊に似せた模擬画像を作成し、Convolutional Neural Network (CNN)で探査を学習させた。これにより、約30%の効率(S/N \sim 1/7)で α 崩壊の検出に成功した[◎出版論文 5.](現在は学習方法を改善し効率約80%(S/N \sim 1/6)に至っている)。

目標の第2は、シングルハイパー核の自動検出であった。今期は、ハイパー核の中で最も基礎的な、 $\Lambda + p + n$ で構成される $^3\Lambda\text{H}$ の $^3\text{He} + \pi^-$ 崩壊を探査した。上記と同様にして作成した模擬画像で学習させ、35cm x 35cmのエマルジョン全面を探査して、4例の $^3\Lambda\text{H}$ の検出に成功した。さらに統計を増やし、 $^3\Lambda\text{H}$ のlifetime (free Λ より短寿命)と Λ 結合エネルギー(非常に小さい)との間にあるパズルの解明に取り組むことができるようになった。

◎出版論文6は、Physical Review Letters 誌の表紙を飾るとともに、研究代表者には第66回(2020年度)仁科記念賞が授与された。

【B02 班「エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造」関連】

東京大学 特任助教 堂園昌伯

「対相関が引き起こす原子核の新型巨大共鳴状態の探索」

巨大対振動(GPV)は、対相関が引き起こす新しいタイプの巨大共鳴状態として理論的に着目されてきたが、これまで実験的情報は皆無に等しい。本研究の目的は、未知の性質を持つ GPV の存在を確定することである。このため、新反応プローブ「(4He,6He)反応」を着想した。6He 内中性子対の弱束縛性を利用したこの反応は、これまで不可能であった運動学的条件を達成し、GPV に対する測定感度をあげることができる。この反応の有効性を確かめるため、東北大 CYRIC にて、 ^{120}Sn 標的に対する実験データを取得した。解析の結果、 ^{118}Sn の励起エネルギー13MeV 付近に従来の(p,t)反応では見えていなかったピークを観測することに成功した。このピークは、Hartree-Fock-Bogoliubov+準粒子乱雑位相近似による最新の理論計算が予測する GPV の位置とよく一致する。さらに歪曲波ボルン近似により反応の角度分布を計算し、実験で得られた分布と比較した結果、誤差の範囲内でよく一致した。これらの結果から、観測されたピークは GPV の有力な候補といえる。今後他の Sn 同位体に対しても同様の測定を行い、GPV の未知の性質を明らかにしていく。本研究はその系統的研究への重要なステップといえる。

大阪大学 教授 川畑貴裕

「ニューラルネットワーク技術を用いたアルファ凝縮相の探索とその物性の解明」

本研究では原子核におけるアルファ凝縮状態を系統的に探索し、その存在を確立したうえで、エネルギーや崩壊幅から低密度核物質の物性を明らかにすることを目的としている。アルファ凝縮状態は複数の低エネルギーアルファ粒子を放出しつつ、より軽い核のアルファ凝縮状態を経由して崩壊されると考えられるので、これを検出するために、大面積の粒子検出器を開発した。このとき、低エネルギー粒子の粒子識別には、近年発展の著しいニューラルネットワーク技術を導入した。粒子識別能を評価するために、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにおいて、核破砕反応によって生成された連続エネルギーの荷電粒子をシリコン半導体検出器に入射させ、陽子・重陽子・アルファ粒子に対する波形を取得した。これを教師あり訓練データとしてニューラルネットワークの育成を行ったところ、信号の立ち上がり時間を特徴量とする従来型の解析手法に比べ粒子識別精度が向上し、1.8 MeV という低エネルギーの陽子とアルファ粒子を 95%以上の精度で識別することが可能となった。今後は、これらの検出器を日本原子力研究開発機構に移設し、同機構の大型タンデム静電加速器施設において、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ の共鳴散乱による 24Mg におけるアルファ凝縮状態の探索実験を行う。

【C01 班「極低温原子で紐解く階層横断エキゾチック物性現象」関連】

北海道大学 准教授 小林 淳

「高速・高感度なイオン化検出による極低温多原子分子研究」

Efimov 状態は、近距離相互作用をする任意の粒子系において、ユニバーサルに現れる少数個の粒子が束縛された状態であり、分野横断的な研究が広がられている。このようなユニバーサルな性質を持つ Efimov 状態の研究は、基本粒子から複合粒子への組み合わせから生じる物質の階層構造を読み解くための鍵となる研究といえる。特に冷却原子系では Feshbach 共鳴を利用して、原子間相互作用を精度良く制御できることが特徴となっており、この特徴を生かした Efimov 状態の研究が広く行われてきた。しかし、冷却原子を用いた Efimov 状態の研究の 1 つの障害となっているのが、Efimov 状態を直接観測ができないことである。私の研究では、パルスレーザーを用いて Efimov 状態を 3 体束縛状態のままイオン化することで、Efimov 状態を高感度に直接的に観測することを目指している。

研究期間内に、高フィネスの光共振器による大きな光増幅機構を活用した 3 次元光格子トラップ中での、原子の冷却手法を開発し、わずか 300ms で BEC 転移温度付近まで冷却する全く新しい冷却手法の開発に成功した。これは今後の Efimov 状態生成の実験に直結する成果であり、学会発表等で報告した。

【C02 班「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」関連】

北海道大学 講師 堀内 渉

「核物質中の原子核クラスター形成に関する物理的、化学的アプローチ」

本研究計画は核媒質中における軽い原子核クラスターの役割を、物理的・化学的両側面のアプローチによって明らかにし、物質中におけるクラスター発現・消滅現象の普遍的な理解を目指す。信頼のおける評価の為、高精度少数体計算を実行し、様々な環境下での少数体系の束縛エネルギーの密度依存性を調べる（物理的アプローチ）。同時にポーラロン描像を用いた化学的アプローチによって、クラスターの有効質量変化を評価し、核媒質-クラスター間及び核媒質中クラスター間相互作用についての知見を得る。

本年度は恒星中で実現されると考えられている熱プラズマ環境中におけるアルファクラスター状態についての知見が得られた。炭素合成において決定的な役割を果たすトリプルアルファ反応において、熱プラズマ中で引き起こされるクーロン遮蔽の効果を原子核状態の有限サイズ効果を取り入れつつ評価した。同時に化学的アプローチによる解析を進め、アルファ粒子-核子間ポテンシャルを基に、一様核媒質中における有効質量変化の評価を行った。これらの結果は誌上論文として出版された。得られた成果を発展させ、中性子物質中のアルファクラスターの存在についての研究成果をまとめ、現在投稿・査読中である。

【D01 班「第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構」】

筑波大学 教授 中務 孝

「量子クラスター出現機構と低エネルギー核反応の非経験的記述」

集団質量を線形応答理論に基づいて計算する方法を開発し、これをアクチノイド領域核の自発核分裂現象に応用した。これまでのクランキング近似に基づいた計算よりも著しく大きな値が得られることがわかった。トンネル確率を WKB 近似で評価すると、質量を改善した今回の結果によって確率が数桁減少することが示唆される。これにより自発核分裂の寿命を過少評価するというこれまでの理論の問題が解決できる可能性を示した。

また、陽子・中性子がアンバランスな原子核において、核表面付近におけるアルファ・クラスターが出現する機構について、アイソベクトル及びアイソスカラー型対相関が果たしている役割を見るため、multi-so(8) model を用いた摂動計算により定性的な分析を行なった。その結果、余剰中性子がある場合、陽子の 2p2h 励起が pn 対相関によって促進され、中性子と陽子が同一軌道を占有することが可能になり、これによってアルファ・クラスターが生成されている可能性を示唆する結果を得た。

新たなコード開発として、グリーン関数の複素エネルギー空間における積分から密度を決定する理論手法を開発し、3次元実空間における有限温度 Hartree-Fock-Bogoliubov 計算を可能にする開発を行なった。中性子星クラストなどを対象に、温度・密度の変化とともにどのような原子核がクーロ

ン格子を組むのか、今後解析を進める予定である。

東京大学 名誉教授 大塚孝治

「動的な殻構造形成とクラスター形成」

研究活動は大きく分けて2つのテーマについて行われた。一つは、原子核におけるアルファークラスタ形成の有無、さらに、有りの場合のクラスター発現の態様や程度を核子系の量子多体問題として解明する研究である。ベリリウム8や炭素12原子核でのアルファクラスター形成を、モンテカルロ殻模型により第一原理的に調べる研究を進めた。研究は2020年度中には終わらなかったが、大きな進展をみて次年度に引き継いだ。

二つ目は、原子核の表面の変形によって引き起こされる動的な殻構造の変化を、核子多体系に働く有効核力の特性と結びつけて行われた研究である。特に、中性子過剰なアイソトープにおける、単極力(モノポール力)、ペアリング力、そして、変形を起こす多重極力(マルチポール力)の効果を中性子数の変化の帰結として求め、それらの総和である結合エネルギーを評価した。結合エネルギーが最大になる原子核がドリップラインであるが、それは変形効果が飽和して減少に転じる変化と結びついていることを明らかにした。さらにモノポール力がこのような飽和効果を延命させて、原子番号によってドリップラインを変えていることも示した。大きな成果として Nature 誌に論文として掲載された。それが、以下のリストの最初のものである。これに沿った研究は引き続き進展している。

新潟大学 准教授 江尻信司

「有限密度格子QCDにおける一次相転移線の終点の数値的研究」

QCDの有限温度・密度相転移がクロスオーバーから一次相転移に変わる臨界密度を、熱浴中での粒子密度の出現確率を表す確率分布関数に注目して研究している。しかし、格子QCDの有限温度相転移を理解するうえで重要なセンター対称性があるために、実際の有限体積の計算では、粒子数が3の倍数の場合以外、確率分布関数は必ずゼロとなる。U(1)ゲージ理論の場合、より極端でその対称性のために電荷がゼロ以外の状態は存在できない。本研究では、その問題に対する解決策を議論した。同時に、有限密度格子ゲージ理論において重要な問題である符号問題の、センター対称性による回避方法を提案した。極端な例であるU(1)格子ゲージ理論で、フェルミオン質量が重い場合に数値シミュレーションを行い、本研究で提案した方法により有限密度での計算が可能であることを例示した。さらに、この方法のQCDへの適用も議論した。また、最近注目されているグラディエント・フロー法を用いた熱力学量の計算も行った。特に、SU(3)格子ゲージ理論の一次相転移点における潜熱について詳しく調べ、従来の方法と比較した。格子が粗い場合の結果は一致し、同じ計算コストでより細かい格子での精度の良い結果が得られることがわかった。

首都大学東京 准教授 兵藤哲雄

「閾値近傍状態で探る物質の階層性の研究」

高エネルギー衝突実験における 2 粒子運動量相関関数は、ハドロン間相互作用を決める新たな手法として注目を集めている。特に、ストレンジネスを多く含む直接散乱実験を行うのが難しい Ω^- 対や、 $\Lambda(1405)$ の性質に関係しハドロン物理に重要な影響を持つ K^-p 対の相関関数が最近 LHC 実験の ALICE グループによって測定されている。我々は格子 QCD 計算により得られたバリオン間相互作用と膨張効果を取り入れたソース関数を用いて、 $N\Omega^-$ および $\Omega^-\Omega^-$ 相関関数の計算を行った。異なるサイズのソースを持つ実験を比較することでダイバリオンの存在を検証できることを示した。また、 K^-p 対の相関関数について、全ての結合チャンネルの効果、 K^-p と $K^0\bar{n}$ の閾値エネルギーの違い、クーロン相互作用の効果を取り込んだ計算を行った。カイラル SU(3) 動力学に基づいた現実的 $\bar{K}N$ ポテンシャルを用いることで、pp 衝突の実験データを精度よく再現できることを示した。さらに、相関関数のソースサイズ依存性を検証し、大きなソースでは低運動量の相関関数が抑制され、閾値カスプ効果が小さくなることを予言した。

京都大学 教授 大西 明

「2粒子運動量相関から探るハドロン間相互作用としきい値近辺の散乱振幅」

ハドロン間相互作用は原子核などのハドロン多体系研究の基盤である。ところが核子を除くハドロンは全て不安定であり、散乱実験の標的にできない。我々は高エネルギー核反応からの様々なハドロン対 ($\Lambda\Lambda$, $p\Omega^-$, pK^- , $p\Xi^-$) の運動量相関を用いて相互作用を議論してきた。運動量相関は相対波動関数の 2 乗と粒子源関数の積分で与えられるため、後者が既知ならば前者から相互作用の情報が得られるのである。2020 年度には $\bar{K}N$ (反 K 中間子-核子)- $\pi\Sigma-\pi\Lambda$ 結合チャンネル効果を取り入れた相関関数の計算プログラムを完成し、 pK^- 相関関数を求め、LHC-ALICE collaboration により観測された pp (陽子-陽子) 衝突からの相関関数データと比較することにより、カイラル動力学による $\bar{K}N$ 相互作用の検証を行った。また $\Lambda(1405)$ が $\bar{K}N$ 束縛状態としての性質を持つか否かを判別する上で、源関数サイズが異なる pA (陽子-原子核), AA (原子核-原子核) 反応での相関関数が有用であることを議論し、予言値を与えた。この研究成果は Phys. Rev. Lett. にて出版されている。ここで開発した理論手法は、結合チャンネル・クーロンポテンシャル・しきい値のズレの効果を初めて全て取り入れて相関関数の計算を実現したものであり、新規性が高く、また適用範囲が広い。

横浜市立大学 教授 立川仁典

「エキゾチック分子系に対する高精度計算のための量子化学的全自由度第一原理手法の構築」

量子モンテカルロ法や経路積分法を駆使して、エキゾチック分子系に対する第一原理手法を構築・実装した。それにより、ミューオニウム化合物や陽電子化合物の高精度計算を可能とした。また今年度は、経路積分法を用いて、水素結合系クラスターの計算を実施し、H/D 同位体効果を解析することに成功した。またこのようなエキゾチック分子系に対して、肥山らの手法を適用している。

慶應義塾大学 特任准教授 鹿野 豊

「非平衡結合クラスター法による量子シミュレーション手法の開拓」

本研究計画においては、ハートリー・フォック法に基づいた電子状態計算に基づいた計算過程を見直すことにより、量子計算機で直接シミュレーション可能な新しいアルゴリズムを構成しようとする目的であった。研究実施機関である慶應義塾大学において、IBM 社がクラウドサービスを提供している超伝導量子ビット型の量子計算機を用いることが出来、その実機の評価を「乱数」の検定との観点を融合させることにより、量子計算機の安定性評価の指標を構築することが出来た。更には、ポスト・ハートリー・フォック法に基づいた完全配置間相互作用法による量子アルゴリズムの計算時間評価について行い、化学的精度と呼ばれるエネルギー精度での計算コストにおいて、計算時間評価を行うためのパラレル化に向けたアルゴリズム評価を行った。更には、実際の量子計算機のデバイスにおいて計算時間の評価をラフに行い、現在のスーパーコンピュータで行われているような分子サイズと同様のものを計算するための計算時間を見積もった。今後、この計算時間の評価をより詳細まで厳密にしていく必要があると考えている。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター センター長 岡 真

「カラードクスターが作るハドロン物質の物理」

スピン0と1のダイクォークを中心に、ハドロン中でカラーが白色ではないクラスター状態が果たす役割をカイラル対称性と重クォーク対称性、クォークの閉じ込めやグルーオン交換による相互作用などの側面で解析した。具体的には、軽いクォークから構成されるダイクォークを基本自由度とするSU(3)カイラル対称性に基づくカイラル有効理論を構築した。スピンとパリティが 0^+ , 0^- , 1^+ , 1^- のダイクォークの有効理論では、カイラル対称性の自発的な破れによる正負パリティダイクォークの質量差の生成、軸性 U(1)アノマリーの寄与によるフレーバー対称性の破れの効果などで新しい発見が得られた。ハドロン分光の結果と比較するために、ヘビークォークと軽いダイクォークの束縛系のスペクトルを有効理論に基づいて計算し、 Λ_Q , Σ_Q , Ξ_Q , Ω_Q の基底状態と励起状態のスペクトルおよびその崩壊をカイラル対称性の観点から解析した。とりわけ Λ_Q と Ξ_Q ではクォーク模型による予想とは異なる結果を得た。