

2019 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」

公募研究 “チャームバリオン内のダイクォーク構造の探求”では、バリオン内部で軽い粒子がダイクォークと呼ばれる準粒子的自由度が存在しているかどうかを明らかにするために、既に発見された状態の量子数の決定及び、これまでに探索されていない崩壊モードの探索を行う。特に、 $\Xi_c(2970)$ のスピンの決定及び、これまでに探索が行われていない $\Lambda_c + \eta$ に崩壊する新しいチャームバリオンの探索を Belle 実験のデータを用いて行う

$\Xi_c(2970)$ のスピンの決定については、 $\Xi_c(2970) \rightarrow \Xi_c(2645)\pi$, $\Xi_c(2645) \rightarrow \Xi_c\pi$ 崩壊という2つの崩壊チェーンにおける角分布両方の測定を行うことにより、 $1/2$ を 4σ の統計精度で決定することができた。また、パリティに関しては $\Xi_c(2645)\pi$ 崩壊と $\Xi_c'\pi$ 崩壊の相対的な崩壊分岐比を測定し、ヘビークォークスピン対称性の計算と組み合わせることによりプラスであることを明らかにした。現在投稿論文を準備中である。 $\Lambda_c + \eta$ に崩壊するモードはブラインド解析を進めている。現在 Belle 実験内部のレビュー中で、まもなく信号領域を開示する予定である。

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、テスト用のアクリル製の 1 mm 幅の試作チェレンコフ放射体と 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を製作した。整形回路は信号後にリングングがあり、高計数率下において信号の重なりによって時間分解能が悪化することが分かった。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。これらの検出器要素について評価試験を SPring-8 の LEPS ビームラインにて実施した。1.0 mm 幅の放射体とさらなる大強度を目指した 0.5 mm 幅の二つの検出器を評価し、双方にて 45 ps(rms) の時間分解能を達成した。フィルター回路のリングング抑制効果と同時に時間分解能が維持される事を確認した。狭い幅の放射体の製作技術の確立、整形回路の開発、検出器要素のテストを完了した。特に当初よりも狭い 0.5 mm 幅の放射体にて十分な性能を得ることができ、計画以上の進展が得られた。

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放射崩壊による新ハドロンの探索」

擬スカラーチャーモニウムである η_c メソンと光子 (γ) からなる終状態への放射崩壊は、スピン(J)・パリティ(P)・荷電共役(C)が $JPC=1^{+-}$ であるチャーモニウムの hc メソンやエキゾチックハドロンで

ある X(3872) の $C=-1$ パートナー状態の探索に適した過程である。Belle 実験のデータ解析ソフトウェアを用いて B メソンが η_c メソン・ γ ・K メソン・ π メソンへ 4 体崩壊し、 η_c メソンを KS メソン・K メソン・ π メソンへの 3 体崩壊で再構成する事象再構成プログラムを作成した。hc メソンが η_c メソンと γ に輻射崩壊する事象のシミュレーションデータを生成し、この多体崩壊を再構成する検出効率が約 2% であること、 η_c メソン・ γ の不変質量分解能が約 16 MeV/c² であることを確かめた。少量の Belle 実験データを解析した結果、大幅なバックグラウンド低減の工夫を講じる必要が判明した。そこで Belle II 実験のソフトウェア環境下で同等の機能を果たす解析プログラムを作成し、信号事象とバックグラウンドの分離を図る多変量解析 (Multi Variate Analysis) を導入する作業が進行中である。

【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」

2018 年から開始したグザイ粒子候補飛跡の全自動追跡を終了し、その結果、ダブルラムダ核およびグザイハイパー核を、先の実験の約 4 倍に匹敵する 34 例検出することに成功した。特にグザイハイパー核は、新たに 6 例のグザイが窒素に吸収されたと同定でき、1 例は基底状態(1s)と考えられる明確に深い軌道(約 6MeV)、2 例は基底状態が一つ上の励起状態(2p: 1[~]2MeV)である。

高速化については、高画素・広視野でかつ高速撮像が可能なカメラを本科研費で購入でき、これまでのグザイ粒子飛跡の追跡へに適用したところ 10 倍速を達成できることが分かった。新たな経費で顕微鏡本体のピエゾを用いた高速駆動の機構の導入により、さらに 10 倍速化の可能性が開けた。これにより E07 実験 (J-PARC) で照射した約 1000 枚のエマルジョンの全面探査を数年で完遂できるものと期待できる。

エマルジョン中の 3 次元飛跡自動追跡およびハイパー核探査に供する、機械学習を開始した。まず Geant4 で、エネルギー較正に用いるアルファ崩壊やビーム反応などを発生させ、得られた荷電粒子の 3 次元情報をもとに pix2pix という画像変換ツールを用いて、エマルジョン中で観察される飛跡の模擬画像を作成できるようになった。

【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」

本公募研究の目的は、原子核の対相関が引き起こす全く新しいタイプの巨大共鳴である「巨大対振動(GPV)」の存在を確定することである。このために、GPV を最高感度で測定できる、無反跳条件による核子対移行反応に着目した。無反跳条件においては、核子対移行反応からの放出粒子が、反応しなかったビームと全く同じ角度、運動量で放出されるため、反応イベントを測定するため

には、ビームによる巨大バックグラウンドを分離しなければならない。そこで、エネルギー減衰板とスペクトロメータを組み合わせたビーム分離法を考案した。新手法が実現可能なスペクトロメータを有する阪大 RCNP への実験課題申請に向けて、現在、実験の詳細を検討中である。また、理論研究者との協力のもと、GPV の性質を探る研究を行なった。その結果、GPV は通常の巨大共鳴とは異なる核子数依存性を持つことが分かった。

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」

令和元年度は、本研究では α 凝縮状態を探索するために、大立体角シリコン半導体検出器の開発を行った。低エネルギー荷電粒子に対する粒子識別を実現するために、検出器からの出力信号の波形解析にニューラルネットワーク技術を導入することをめざした。構想中の検出器では 5 モジュール×24 チャンネルの信号読み出しを行う計画であるが、他チャンネル検出器の波形測定ではデータ量が膨大となるために、粒子が検出されなかったチャンネルのデータ取得を抑制するゼロ抑制機能の導入が必須である。Flash ADC モジュールの製造元であるイタリア・CAEN 社と連携しつつ、ゼロ抑制機能を持つデータ収集系の構築を行った。また、12C+12C 共鳴散乱を用いた 24Mg における 6α 凝縮状態探索実験について、現実的な実験条件を踏まえた詳細なシミュレーション計算を行い、実験提案書を執筆した、この提案書に基づいて、日本原子力研究開発機構のタンデム加速器施設におけるビームタイム申請を行い、11 日間のビームタイムが採択された。

【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」

本研究は、冷却原子系において生成される Efimov 状態の直接観測を通して、Efimov 状態についてのさらなる深い研究を進めることによって、物質の階層構造を読み解いていくことを目標とした研究である。2019 年度は Efimov 状態生成のための原子の冷却実験を行った。Efimov 状態を生成するためには、原子気体を量子縮退温度付近まで冷却する必要がある。本研究では、近年他のグループによって開発された手法を、さらに発展させた手法を開発している。その手法では、原子を光格子にトラップし、その中で原子のレーザー冷却を行うことによって、高速で原子ロスが少ない冷却が実現される。

これまでに、光共振器によって光強度増幅された光格子を生成することで、先行研究の 1 万倍も多くの原子をトラップすることに成功している。さらに、レーザー冷却と光格子の強度制御による圧縮によって、1 マイクロケルビン以下という量子縮退温度付近への冷却も実現した。Efimov 状態の生成の直前まで迫っている状況である。

【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」

本研究計画で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、様々な環境下での原子核の構造変化を調べる(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。

前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。恒星中の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、熱プラズマ中にて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。また、微視的6体計算によるリチウム6の光励起についての研究も行い、その励起機構はクラスター構造を考えることが本質的であることを示した。同時に化学的アプローチによる解析を進めており、最も簡単な現象論的なアルファ粒子-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。

東京大学 准教授 竹内 一将

「液晶乱流における量子的渦糸の直接観測と階層構造の解明」

量子流体の量子渦と一定のアナロジーを有する液晶のトポロジカル欠陥を、蛍光色素で可視化し、高速の共焦点顕微鏡でその3次元構造と動力学的直接計測を行った。特に、欠陥どうしの再結合過程の計測に注力した結果、量子流体と異なり、液晶系では2本の欠陥の運動が有意に非対称であることを見出した。この非対称性は、線欠陥の構造的要因(曲率など)では説明できないことを確認し、欠陥周囲の配向場や流れ場の構造などに原因を探る試みを始めている。また、乱流により欠陥を多数生成し、その緩和過程を計測したところ、トポロジー特徴量(巻き数)が $\pm 1/2$ の特異的な線欠陥に加え、巻き数が ± 1 の非特異的な線欠陥や、モノポールなど、様々な欠陥が発生し、相互作用し、接合した大規模構造を作ることが観察できた。本構造は、小スケールの欠陥がネットワーク状に結合したものであり、階層構造の観点から興味深い。現在、量子渦の理論家と共同で、本構造における配向場の仮説構築を行うとともに、未知な点の多い非特異欠陥の相互作用を調査する数値計算も行っている。

【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」

本公募研究は、低エネルギー核反応におけるクラスターの出現・消滅機構を、微視的に記述する理論の開発と計算コードの整備を目的としている。2019 年度には、対相関を無視した時間依存ハートレー・フォック理論に基づく集団核反応経路の同定と、集団慣性質量・集団ハミルトニアン¹の微視的導出に成功した。軽い原子核の低エネルギー反応における集団質量の効果が明らかとなり、実験で観測されている深部サブバリア核融合反応断面積の著しい低下について、これまでの現象論的解析とは異なる微視的解釈が与えられた。また、対相関(核子対凝縮)を取り入れ、静的ハートレー・フォック・ボゴリューボフ(HFB)理論に基づく3次元の非制限計算の計算コードを開発し、中性子星クラスタにおけるクラスター出現に応用した。これらの成果を進展させ、時間依存 HFB 理論の枠組みにおいて低エネルギーの量子的核反応に適用することを目指している。この開発により、重い原子核の核反応・核分裂における様々な謎に挑戦できる理論的・計算的基盤を整備する。対相関がもたらす新規の量子揺らぎの効果を、核反応実験データから定性的・定量的に見積もることを目指す。

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」

本公募課題にとっては初年度にあたり、原子核を陽子と中性子からなる多体系として扱う第一原理計算をモンテカルロ殻模型を応用して進めた。主な対象とした原子核はベリリウム 8,10,12 と炭素 12 である。内部コアを仮定せず、全ての核子を活性化して計算を遂行した。殻模型計算に属するが、調和振動子ポテンシャルの固有状態を一粒子基底として採り、それを $0h\nu$ から $7h\nu$ まで取り込む文字通り世界最大の計算である。相互作用としては、*ab initio* 的なものである Daejeon 16 相互作用などを用いている。計算は令和1年度の間最終段階まで行っている。例えば、 ^{12}C のエネルギー準位や E2 遷移強度などの第一原理計算に成功している。クラスター構造の生成に関しても、ベリリウムと炭素それぞれについて、その形成のアイソトープ間での変化やホイル状態での発現が分か利、論文準備中である。

クラスター形成に加えて、動的な殻構造が重い原子核の四重極変形に与える決定的な役割を見出し、それが自己組織化という大きな枠組みで理解できることも示した。この研究で行ったモンテカルロ殻模型での結果から、重い核の四重極変形バンドの内、励起バンドについてはコペンハーゲン流の解釈による、ノーベル賞にも寄与した伝統的なものは基本的に正しくないことが示された。自己組織化に基づき、実験データとも合致している新しい描像を示し、論文として発表した。これは *Physical Review Letter* 誌の Editors' Suggestion に選ばれ注目されており、本新領域にも広く関わっていくことが期待される。

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」

公募研究「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」では、高温高密度 QCD の相転移の性質を、第一原理計算である格子 QCD の数値シミュレーションにより研究してい

る。QCD の有限温度相転移の性質は、クォークの密度と質量により変化する。現実のクォーク質量で、高密度の場合に、その相転移がどのように変化するかを調べることは、現在非常に関心がもたれている研究テーマである。しかし、高密度での格子 QCD 研究は、深刻な「符号問題」により妨げられている。この研究では、センター対称性という理論のもつ対称性をうまく利用して符号問題を回避することを考えた。U(1)ゲージ理論や QCD でも低温相では、その回避法を適用できることが分かった。また、同時に、現実のクォークの質量点から離れているが、クォークが重い領域での一次相転移がクロスオーバーに変わる臨界点について研究した。さらに、最近注目されている small flow-time expansion (SFTX)法による QCD の相転移点付近での熱力学量の計算も行った。

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ハドロン間相関について国際共同研究を行い、チャンネル結合を取り込んだ $K\text{-}p$ 相関関数の解析を行った。弱束縛状態の波動関数の性質とサイズの関係を導き、低エネルギー普遍性との関連を明らかにした。

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。2019 年度にはまず格子 QCD から得られた ΩN 相互作用を用いた $p\Omega^-$ 相関関数の研究を進めた。新たに開発した統計・系統誤差評価方法を用いてデータが合理的に理解できることを示し、格子 QCD からの ΩN 相互作用を検証できた。またカイラル SU(3) 動力学を用いた pK^- 相関関数についても研究を進めた。研究協力者の神谷有輝氏(CAS-ITP)を中心に結合チャンネル・クーロン力・しきい値のずれなどの複雑な要素を取り入れたプログラム開発を行い、データとの比較によりカイラル動力学からのポテンシャルの妥当性を確認するとともに、粒子源サイズが異なる場合の相関関数の予言を行った。

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始めた。以上の成果により第 4 回 (2019 年度) 分子科学国際学術賞を受賞すると共に、10 報の査読付き国際誌に報告した。

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」

本公募研究の目的は、原子核物理分野・物理科学分野で培われた量子多体系の数値計算手法の一つである「結合クラスター法」を拡張し、非平衡過程の中で実現される「結合クラスター法」を用いた量子シミュレーションの実現にある。これまでは、既存手法である「結合クラスター法」をレビューしていき、現在、拡張の応用事例として注目されている量子コンピュータのアルゴリズムでの話を調査した。更には、非平衡過程を量子コンピュータで実装するために、どのようなノイズがありうるだろうか？というノイズ調査方法に関して統計的な手法開発を行った。既存のノイズモデルの構築方法は、小数量子ビットの時のみを調べられる手法になっているものが多かったが、「コンピュータの安定性」という概念を創出し、その手法を統計学の知見を利用して開発した。今後は、量子シミュレーション応用が出来るような手法開発を行うと共に、実装を念頭においた研究を引き続き行っていく。その際、「計算リソース」と「量子シミュレーションのエラー」の関係性について議論を行っていく。

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」

ハドロンの構造を記述するクラスターは、カラーの自由度をあらわに持つことができる。この新しいカラードクスターのダイナミクスを記述する有効理論を構築し、それを用いてヘビークォークなどを含むバリオン、テトラクォーク、ペンタクォークなどの新規なハドロンのスペクトルや構造を解明することが公募研究の目標である。公募研究1年目には、軽いクォーク (u, d, s) 2個からなるダイクォークに注目し、線形カイラル有効理論に基づく解析を行った。ダイクォークのカイラル対称性に基づく分類から、スカラーと擬スカラー、ベクトルと軸性ベクトルのダイクォークがそれぞれカイラルパートナーとなることを示し、カイラル対称な有効理論の一般形を用いてダイクォークの質量間の関係式を導いた。特に、擬スカラーダイクォークにおけるフレーバー対称性の破れが、軸性 U(1) アノマリーによって、逆ヒエラルキーの質量分布を与える現象に注目し、チャームバリオン Ξ_c の負パリティの励起状態にその証左が得られる可能性を指摘した。