

領域略称名: クラスター階層
領域番号: 6005

令和5年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究(研究領域提案型)」
に係る研究成果報告書(研究領域)兼
事後評価報告書

「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」

領域設定期間
平成30年度～令和4年度

令和5年6月

領域代表者 東京工業大学・理学院物理学系・教授・中村 隆司

目 次

研究組織

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額	9
4 研究領域の目的及び概要	10
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	12
6 研究目的の達成度及び主な成果	14
7 研究発表の状況	19
8 研究組織の連携体制	24
9 研究費の使用状況	25
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	27
11 若手研究者の育成に関する取組実績	28
12 総括班評価者による評価	29

研究組織(令和5年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	18H05400 総括班	平成30年度 ～ 令和4年度	中村 隆司	東京工業大学・理学院・ 教授	1
A01 計	18H05401 クォーク階層とハドロン階層を繋ぐ動的機構	平成30年度 ～ 令和4年度	志垣 賢太	広島大学・ 先進理工系科学研究科・ 教授	4
A02 計	18H05402 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	平成30年度 ～ 令和4年度	大西 宏明	東北大学・ 電子光理学研究センター・ 教授	6
B01 計	18H05403 ストレンジ・ハドロンクラスターで探る物質の階層構造	平成30年度 ～ 令和4年度	田村 裕和	東北大学・理学研究科・ 教授	4
B02 計	18H05404 エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造	平成30年度 ～ 令和4年度	中村 隆司	東京工業大学・理学院・ 教授	5
C01 計	18H05405 極低温原子で紐解く階層横断エキゾチック物性現象	平成30年度 ～ 令和4年度	高橋 義朗	京都大学・理学研究科・ 教授	2
C02 計	18H05406 物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理	平成30年度 ～ 令和4年度	堀越 宗一	大阪市立大学・ 理学研究科・特任准教授	4
D01 計	18H05407 第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構	平成30年度 ～ 令和4年度	肥山 詠美子	東北大学・理学研究科・ 教授	6
総括班・総括班以外の計画研究 計 8 件(廃止を含む)					

[1] 総:総括班、国:国際活動支援班、計:総括班以外の計画研究、公:公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
公	19H05140 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	令和元年度 ～ 令和2年度	堀内 渉	北海道大学・理学研究院・講師	1
公	19H05141 光子ビームを使った η N 散乱長の精密測定による核子共鳴 N(1535)S11 の研究	令和元年度 ～ 令和2年度	石川 貴嗣	東北大学・電子光理学研究センター・助教	1
公	19H05142 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	令和元年度 ～ 令和2年度	中務 孝	筑波大学・計算科学研究センター・教授	1
公	19H05143 対相関が引き起こす原子核の新型巨大共鳴状態の探索	令和元年度 ～ 令和2年度	堂園 昌伯	東京大学・大学院理学系研究科・特任助教	1
公	19H05145 動的な殻構造形成とクラスター形成	令和元年度 ～ 令和2年度	大塚 孝治	東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授	1
公	19H05146 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	令和元年度 ～ 令和2年度	江尻 信司	新潟大学・自然科学系・准教授	1
公	19H05147 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	令和元年度 ～ 令和2年度	仲澤 和馬	岐阜大学・教育学部・教授	1

公	19H05148 チャームバリオン内のダイクォーク構造の探求	令和元年度 ～ 令和2年度	加藤 悠司	名古屋大学・現象解析研究センター・特任助教	1
公	19H05149 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	令和元年度 ～ 令和2年度	小林 淳	京都大学・理学研究科・特定准教授	1
公	19H05150 閾値近傍状態で探る物質の階層性の研究	令和元年度 ～ 令和2年度	兵藤 哲雄	首都大学東京・理学研究科・准教授	1
公	19H05151 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	令和元年度 ～ 令和2年度	大西 明	京都大学・基礎物理学研究所・教授	1
公	19H05152 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	令和元年度 ～ 令和2年度	白鳥 昂太郎	大阪大学・核物理研究センター・助教	1
公	19H05153 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 ～ 令和2年度	川畑 貴裕	大阪大学・理学研究科・教授	1
公	19H05154 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	令和元年度 ～ 令和2年度	宮林 謙吉	奈良女子大学・自然科学系・教授	1
公	19H05155 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	令和元年度 ～ 令和2年度	立川 仁典	横浜市立大学・データサイエンス学部・教授	1

公	19H05156 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	令和元年度 ～ 令和2年度	鹿野 豊	慶應義塾大学・理工学研究科・特任准教授	1
公	19H05159 カラードクラスターが作るハドロン物質の物理	令和元年度 ～ 令和2年度	岡 眞	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・センター長	1
公	21H00113 光核反応からのクラスター崩壊の理論研究と最高エネルギー宇宙線への応用	令和3年度 ～ 令和4年度	木村 真明	北海道大学・理学系・教授	1
公	21H00114 光子ビームを使った η N 散乱長の精密測定による核子共鳴 N(1535) S11 の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	石川 貴嗣	大阪大学・核物理研究センター・教授	1
公	21H00115 二電子系ポジトロニウム化合物の部分系構造解析	令和3年度 ～ 令和4年度	山下 琢磨	東北大学・高度教養教育・学生支援機構・助教	1
公	21H00116 原子核ハロー状態のエフィモフ理論による統一的記述	令和3年度 ～ 令和4年度	遠藤 晋平	東北大学・理学研究科・助教	1
公	21H00117 原子核におけるアルファクラスター発現の第一原理的研究	令和3年度 ～ 令和4年度	大塚 孝治	東京大学・理学系・名誉教授	1
公	21H00118 ダブル Λ ハイパー核の分光実験に用いるガス検出器の読み出しシステム構築と性能評価	令和3年度 ～ 令和4年度	藤岡 宏之	東京工業大学・理学院・准教授	1

公	21H00120 殻模型的手法によるクラスター崩壊現象の新展開	令和3年度 ～ 令和4年度	萩野 浩一	京都大学・理学研究科・教授	1
公	21H00121 2粒子・3粒子運動量相関から探るハドロン間相互作用	令和3年度 ～ 令和4年度	大西 明	京都大学・基礎物理学研究所・教授	1
公	21H00122 排他的ドレムヤン反応を用いた核子構造研究のためのミュオン検出器の開発	令和3年度 ～ 令和4年度	富田 夏希	京都大学・理学研究科・特定助教	1
公	21H00123 新型ガス標的システムによる ^{20}Ne 原子核のアルファ凝縮状態の探索	令和3年度 ～ 令和4年度	足立 智	東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教	1
公	21H00124 クォークグルーオンプラズマ中における軽重クォーククラスター生成とその実験的帰結	令和3年度 ～ 令和4年度	浅川 正之	大阪大学・理学研究科・教授	1
公	21H00125 ノックアウト反応の正確な描述に基づく核内重陽子・ダイニュートロンクラスターの実証	令和3年度 ～ 令和4年度	緒方 一介	九州大学・理学研究院・教授	1
公	21H00127 励起エネルギー領域でのクラスター形成とその極限としてのアルファ凝縮相形成	令和3年度 ～ 令和4年度	船木 靖郎	関東学院大学・理工学部・准教授	1
公	21H00128 J-PARCでの陽子・原子核衝突における前方 $\Phi \rightarrow K+K$ -崩壊測定手法の確立	令和3年度 ～ 令和4年度	佐甲 博之	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究主幹	1

公	21H00129 K 中間子ビームを用いた軽いハイパー核の寿命測定	令和3年度 ～ 令和4年度	橋本 直	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職	1
公	21H00130 HypTPC を用いた少数系 K 中間子クラスターK-pp, K-ppp の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	市川 裕大	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職	1
公	21H00131 アクティブ炭素標的を用いたグザイ原子 X 線分光	令和3年度 ～ 令和4年度	山本 剛史	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・任期付研究員	1
公	21H00132 カイラル有効理論に基づくダイクォーククラスターの複合系の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	岡 眞	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・客員研究員	1
公	21H00133 高統計ラムダ陽子散乱のためのビーム TOF 用読み出しシステムの開発	令和3年度 ～ 令和4年度	本多 良太郎	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授	1
公	21H00134 有限密度媒質中でのクォーク関連の解明に向けたレプトン対精密測定	令和3年度 ～ 令和4年度	高橋 智則	国立研究開発法人理化学研究所, 仁科加速器科学研究センター, 協力研究員	1

公	19H05144(廃止) 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	令和元年度 ～ 令和2年度	竹内 一将	東京大学, 大学院理学系 研究科, 准教授	1
公	21H00119(廃止) チャームバリオンの励起構造の実験 的研究	令和3年度 ～ 令和4年度	加藤 悠司	名古屋大学・素粒子宇宙 起源研究所・助教	1
公募研究 計 39 件(廃止を含む)					

[1] 総:総括班、国:国際活動支援班、計:総括班以外の計画研究、公:公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	318,760,000 円	245,200,000 円	73,560,000 円
令和元年度	301,990,000 円	232,300,000 円	69,690,000 円
令和 2 年度	298,480,000 円	229,600,000 円	68,880,000 円
令和 3 年度	294,580,000 円	226,600,000 円	67,980,000 円
令和 4 年度	289,120,000 円	222,400,000 円	66,720,000 円
合計	1,502,930,000 円	1,156,100,000 円	346,830,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

学術的背景：クォーク・ハドロン・原子核・原子・分子という微視的物質の階層構造がなぜ存在するのかという問いは、自然科学の根源的問題でありながら従来あまり議論されてこなかった。これは各階層が完全に分離しているように見え、その間に関連性が見られなかったからである。一方で、「クラスター」という概念の中に、階層の垣根を越えるある種の共通点が認識されるようになった。本領域は、我が国が世界をリードする**ハドロン物理、原子核物理、原子物理、分子科学分野**の研究者の力を結集し、物質階層間の分野の壁を越えた連携研究を実現し、この問題に挑むものである。本研究の目的は、**異なる階層間の境界に現れるクラスター現象**に焦点を当てて研究を進め、スケールの異なる物質を支配する普遍的な量子多体系の法則を見出すとともに、普遍性からのずれを理解し各物質階層の研究を深化させることである。そして、**物質の階層構造の起源にせまる新しい融合分野の創成**を目標とする。

物質の階層は図1(左)に示すように、クォーク、ハドロン、原子核、原子、分子の各層からなり、それぞれに属する粒子の基本単位「構成粒子」とその間の「力」で特徴づけられる。構成粒子が複合粒子の場合が「クラスター」である。例えば、原子核の構成粒子「核子」はクォークでできた複合粒子(クラスター)で、その間の力は「核力」である。クォーク3個の色荷(自由度)が白色化(中和)することによってグルーオンを介した強い力は届かず、弱化した「核力」によって核子は結合する。

本領域では、従来型階層の「境界・中間」に属する「セミ階層」(図1右)に着目し、そこに現れる新奇クラスターの性質を明らかにすることで、異なる階層を貫く普遍性を引き出すことを目指した。セミ階層は、ダイクォーク、中間子、ダイ中性子、 α 粒子、強相関フェルミ原子対などの新奇クラスターを構成要素とする層であり、従来型のクォーク、核子、原子を構成粒子とする純粋系ではない。セミ階層でのクラスター形成には「自由度」の中和の他、「閾値則」という階層を貫く普遍的メカニズムが示唆されている。また、セミ階層では、クラスター生成前の下階層の自由度も現れていることが多く、この「クラスターの度合い」を階層の「分離度」と捉えて研究を進めることができる。

計画研究は以下のように組織した。**クォーク・ハドロン分野**では CERN で行われる高エネルギー重イオン衝突によるクォークグルーオンプラズマの実験(A01 班)、世界最高性能のハドロン実験施設 J-PARC、高強度光ビームを誇る SPring-8 でのエキゾチックハドロンの実験(A02 班)、**原子核分野**では J-PARC におけるハイパー核やストレンジネスの入った中間子原子核の実験(B01 班)、世界最高強度の不安定核ビームが供される RIBF(理研)における不安定核の実験と、世界最高分解能の核分光実験施設 RCNP(阪大)における三体核力の実験(B02 班)、**原子・分子分野**では、独創的なアイデアを持つ2つのグループで行われる冷却原子による量子シミュレーション実験(C01, C02 班)、さらに、少数粒子系の厳密計算や第一原理計算で実績のある研究者らによる階層を繋ぐ**理論分野**の研究(D01 班)である。A、B 班で様々な新奇クラスターの探索や精密観測、クラスター間の「力」を探る実験研究が行われる。冷却原子の量子シミュレーション(C 班)では、クラスター現象や普遍的な「力」・相関に関する情報を引き出す。さらに第一原理計算(D01 班)で各階層のクラスター現象や力を理解し、普遍性を明らかにする。一方で、普遍性からのずれから特定の階層に固有の性質を明らかにする。

どのような点が革新的・創造的な発展が期待される研究領域であるか

i) 各階層の構成粒子である「クラスター」とこれを支配する「力」の第一原理的理解：

階層を構成する「クラスター」とクラスター間の「力」(及びクラスター内の力)を理解することが、その階層の理解の基本であり、本研究の最重要課題である。特に、クラスター間の「力」(B01 班)や未知の「三体力」(B02 班)をそれぞれ J-PARC や RCNP で精密測定し、冷却原子系のシミュレータ(C01 班)と

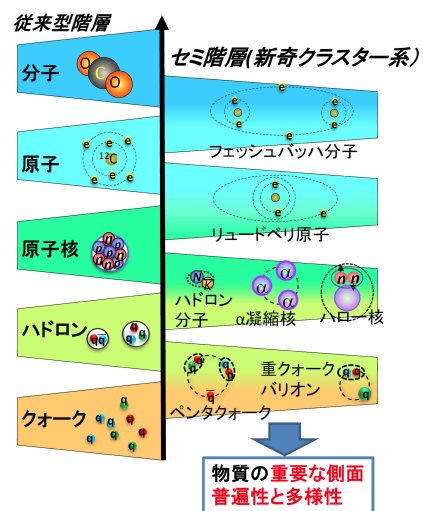


図1. 物質の階層とセミ階層の概念図

さらに第一原理計算(D01 班)で各階層のクラスター現象や力を理解し、普遍性を明らかにする。一方で、普遍性からのずれから特定の階層に固有の性質を明らかにする。

比較し、第一原理的理論計算(D01 班)により下部の基本階層から解読することで、階層を超えた横断的理解を進める。こうした階層間の関係性・結びつきに直接挑む研究、分野を越えての研究は世界的にもほとんどなく、これまでほとんど進んでいなかった研究領域であり、革新的である。

ii) セミ階層の「クラスター」を理解し、階層を貫く原理を探る

「セミ階層」の新奇クラスターに共通の現象を探るという研究は世界初であり、革新的である。本研究では、新たな自由度を持った「新奇量子クラスター(系)」を観測する(A01, A02, B01, B02, C01, C02 班)。こうした新奇クラスターやクラスター形成について、冷却原子シミュレータ(C01, C02 班)との比較や、理論による第一原理的理解(D01 班)を進め、セミ階層に共通の原理や各セミ階層独自の性質を明らかにする。

こうした目的を達成するため、具体的には、各計画研究において以下の研究を進める。

A01 班：高エネルギー原子核衝突実験 ALICE を CERN で推進し、クォーク層からハドロン層への動的過程の研究を進める。ダイクォーク、エキゾチックハドロンの出現、完全流体とされるクォークグルーオンプラズマの性質、ハドロン物質への転移機構にみられる普遍性について他班との連携研究を進める。

A02 班：クォーク-ハドロン間、ハドロン-原子核間のセミ階層を J-PARC, SPring-8 の実験で探る。セミ階層の有効自由度(構成要素)として期待されながら未だに謎となっている「ダイクォーク」や、ハドロン階層で存在すると考えられるハドロン分子の存在を明らかにし、階層を貫く普遍性を探る。セミ階層という境界領域を探索するために、原子核階層を研究の対象とする B01 班との連携も行う。

B01 班：ストレンジクォークを含むハドロンクラスターを J-PARC の実験で調べ、クォーク間の強い相互作用からハドロン間「力」が生ずるメカニズムを解明する。中間子原子核(K_{pp} 等, 原子核-ハドロンセミ階層)の性質や分離度を調べる。世界初の高統計 Σp 散乱実験を実現しバリオン間「力」を決定し、新奇クラスターHダイバリオン(6クォーク系)やK中間子原子核の探索などを行う。

B02 班：4~6個の中性子でできた多中性子クラスターを探索し、またその構成粒子ともなりうるダイ中性子の性質を理研 RIBF の不安定核実験で調べる。また、ダイ中性子について、他階層にも現れる強相関フェルミ対との類似性に着目して他班とも連携する。さらに、原子核層の核子同士を結びつける「核力」をクォークレベルから理解するため、三体核力に関する精密実験を阪大 RCNP で行う。

C01 班：大質量比を有する Er, Yb, Li からなる超低温原子混合系を生成し、異種原子間の相互作用を制御したフェッシュバツハ共鳴法を確立し、角運動量を持つエフィモフ 3 量体等の特異な性質を実験的に解明する。B02, D01 班と連携し、Yb 原子の準安定状態と基底状態の間のフェッシュバツハ共鳴を用いた占有数分解超高分解能レーザー分光実験を遂行し、広範な相互作用領域で光格子中原子の「3体力」のエネルギーを実験的に決定するとともに、3体系の理論数値計算を遂行し定量的に説明する。

C02 班：冷却原子の高い操作性を駆使し、セミ階層に存在する量子クラスターの量子シミュレーション実験を行う。量子系を段階的に調整できる冷却原子系の長所を活用し、相互作用や熱力学量を制御し、自由粒子からクラスター状態まで連続的に変化させ、多面的な精密測定により階層変化に伴う普遍性を探る。また、他階層の実験と比較し、階層多様性の起源を明らかにする。実験結果の背景にある量子クラスターの普遍的な法則を、凝縮系や原子核理論研究と連携し解き明かす。

D01 班：クラスターをキーワードに「物質階層進化のメカニズム」を理論的に解明する。共通の手法と発想による分野横断型理論研究を展開し、他班と連携し「物質階層学」を推進する。各階層におけるクラスター形成メカニズム、物理的普遍性、相違点を解明する。また、第一原理計算としての格子 QCD によるハドロン間相互作用の構築、その相互作用を使用したバリオン少数計算、及び他班との連携により、基礎となる原子核層の「力」を解明する。

以上のように研究を進めることで、以下のような成果が領域設定期間後に期待される。すなわち 1) セミ階層の新奇クラスターを構成要素としてできる新しい粒子(状態)の発見と多様な現象の解明, 2) より基本的な下部階層からの「力」「クラスター」の第一原理的解読, 3) 冷却原子系を用いたハドロン・原子核、一般の量子多体系に対する量子シミュレータの実現, 4) 「分離度」「閾値則」「強相関フェルミ粒子対」などセミ階層を特徴づける概念や法則の統一的理解, である。

本領域のように階層を跨ぐ連携研究を実験・理論両面からこれほど大規模に進める研究は革新的であり、世界初の試みである。また、新奇クラスター系が各階層の中間的な特徴をもったセミ階層として現れるという認識は全く新しい視点であり、これによって量子多体系の物理、物質科学の新しい分野が開拓できる。こうして、物質科学の新たな融合領域の創成を目指す。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

➤ 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

審査結果の所見「既存の実験研究を発展させるだけでなく、シミュレーションと理論研究が全体を結びつける鍵となって、系のスケールや相互作用を超えた類似性を探索する独創性の高い計画である」と高い評価をいただいた。一方で、「領域組織はハドロンと原子核の実験を主に行う計画研究、冷却原子系を用いた量子シミュレータの計画研究、そして第一原理計算から全ての階層を理解する理論の計画研究から構成される。研究領域全体としての成果を挙げるためには、各計画研究間の交流を深める必要があり、そのための具体的な方策をより深く検討することが必要である」との助言をいただいた。

これを踏まえ、本領域研究では総括班が中心となり図2に示すさまざまな活動を通じ、異なる階層間で研究交流を深め、共同研究を促進した。特に「物質階層を横断する会」「国際レクチャーシリーズ」「検出器ワークショップ」を柱とした。

「物質階層を横断する会」：副題を「ハドロン・原子核・原子・分子合同ミーティング」とし、毎回トピックを決めて、多面的議論を展開するワークショップである。講演者を3～5人程度に絞り、他の分野の参加者がどんな質問でもできるという雰囲気、徹底的に議論する会とし、計11回行った。この取り組みで異なる階層間、実験-理論間の連携が進んだ。

「国際レクチャーシリーズ」：世界的に活躍する著名研究者を講師として招聘し（一部オンライン）計12回行った。「力」「少数粒子系」など階層を超えた普遍性に焦点を当てたテーマを設定した。これにより、それぞれの階層の物理をより深く理解することにつながった。また、若手のミニワークショップを同時開催し、若手をプロモートした。

「検出器ワークショップ」：それぞれの分野で使う検出器についての情報交換を通じ、各グループの実験技術強化を目指した。1回目は、新学術領域「宇宙観測測定器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。（代表高橋忠幸氏）」との合同ワークショップとして行った。この領域は加速器実験に関する精密測定技術の開発を中心テーマとする領域研究であり、本領域の研究者、学生にとって多くの収穫があった。2回目は本領域内での検出器ワークショップを行った。J-PARCとRIBFのユーザーを中心にKEK回路室の協力も得ながら高速読出し回路系の共通化の議論を進めた。

以上に加え、領域全体でのスクールを5回、研究会（領域研究会）を8回、国際シンポジウムを2回主催し、後者では海外の著名な研究者を招へいし、階層をつなぐ研究について活発な議論を交わした。

さらに2019年12月には総括班が中心となって今後の連携研究を探る「戦略会議」を開催し、下記の7つのテーマを階層間の連携を強める戦略課題として設定した（7戦略課題）。

- ✧ 粘性、完全流体挙動（A01,C01,C02,D01班）
- ✧ 重イオン衝突とハドロン生成 vs. 原子分子衝突と原子分子生成（A01,C02,D01班）
- ✧ 3体力(B01,B02,C01,C02,D01班)
- ✧ ダイクォーク、ダイ中性子、強相関フェルミ原子対(A01,A02,B01,B02,C01,C02,D01班)
- ✧ ハドロン分子とフェッシュバッハ分子の諸問題と普遍性（A01,A02,B01,C01,C02,D01班）
- ✧ α クラスタと冷却原子のSU(4)系（B02,C01,D01班）
- ✧ 核力の媒質効果（B01,B02,D01班）

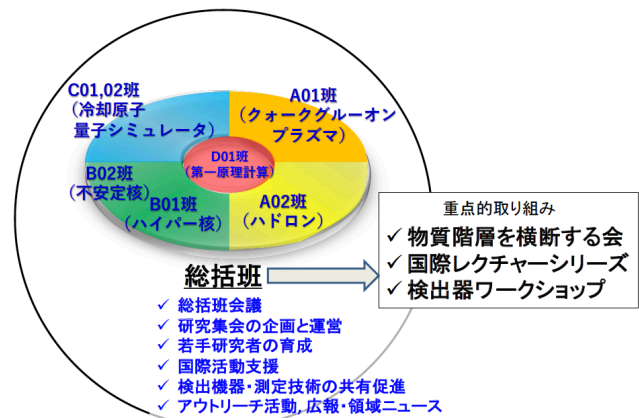


図2. 階層をつなぐ本領域の取り組み

▶ 中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

中間評価は A であり、「階層構造をつなぐ原理を統一的に理解しようとする挑戦的かつ興味深いテーマであり、これまでに個々の計画研究において様々な新奇な知見を創出していると認められる。一部には顕著な研究成果も見られ、全体として領域運営は順調であると言える。」と高い評価をいただいた。一方、「本研究領域が目指す「各物質階層を超えて有機的に結び付ける」という段階には至っておらず、広範な階層を貫く普遍性やセミ階層といった概念を追究するための戦略は現段階では明確ではない。領域代表者並びに総括班の強いガバナンスの下で、本来の目的について研究領域内で共通した目的意識を確立し、連携を加速させる方策が望まれる。後半では、新学術領域研究として分野間の連携による新たな学理の創成に期待する。」との指摘をいただいた。

この指摘に基づき、上記の **7 戦略課題について集中的に連携研究を推進する** こととした。そのため「物質階層を横断する会」「国際レクチャーシリーズ」「検出器ワークショップ」に加えて、「**分野横断インフォーマルミーティング**」、「**クラスター勉強会**」を総括班が企画・開催した。「分野横断インフォーマルミーティング」では戦略的テーマの一つを専門家に講義してもらい、その後徹底的に議論する会とした。また、「クラスター勉強会」は一人の専門家にセミナーをしてもらい、特定のテーマについて深く学び、議論をする場とした。

戦略的課題の一つ「**3 体力**」については 2 回の分野横断インフォーマルミーティングで取り上げた。その結果、原子分子階層の C01 班が、原子核階層における三体力研究の知見を光格子における 3 体力の研究成果に繋げた。B02 班においては原子核階層における「3 体力」「多体力」の実験研究が進んだ。

戦略の一つ「**ダイクォーク、ダイ中性子、強相関原子フェルミ対**」については、シリーズの「物質階層を横断する会」として「ダイ中性子」「ダイクォーク」を総括班が企画し、この中で、このテーマについて徹底的に議論した。それぞれの理解は深まり共通点が見出される一方、ここでは核子系とクォーク系におけるフェルミオン対の違いも改めて認識された。B02 班(不安定核)の実験ではさまざまなダイ中性子の研究成果が出ており、たとえば、冷却原子系における BCS-BEC クロスオーバー領域のフェルミオン対と同様に密度の特定領域に現れやすいことが示され、階層を貫く普遍的な性質も明らかになっている。

戦略的課題の一つ「**粘性**」についても連携を進めた。冷却原子における粘性率の性質と、クォーク階層のクォークグルーオンプラズマ(QGP)における粘性率の振る舞いについてアナロジーが指摘されており、この問題を「分野横断インフォーマルミーティング」「クラスター勉強会」「物質階層を横断する会」を通じてお互いに勉強し、また深く議論した。**C02 班**(冷却原子)の理論研究から、実際に冷却原子系についての粘性率の相互作用・温度依存性の振る舞いが詳細に調べられ、QGP の粘性率にも適用できることが示唆された。

「**クラスター間力**(クラスター間相互作用)」は各階層の個性を作るとともに、それが上下の階層との橋渡しもする。そのことから、上で述べた「3 体力」のみならず、2 体の相互作用の第一原理的理解や、実験的な理解を各階層で進めた。総括班ではこうした成果を領域研究会や国際シンポジウムで積極的にとりあげ、また、適宜「階層を横断する会」で議論を深めながら連携を強めた。国際レクチャーシリーズにおいても「力」の研究をとりあげた。**B01 班**ではストレンジをもつハイペロンと核子の相互作用の精密測定に成功し、これを **D01 班**の第一原理的計算で理論的に理解する連携が進んだが、「階層を横断する会」が活用された。

「**クラスター形成**」も本領域の中心的テーマである。「クラスター勉強会」「国際レクチャーシリーズ」を通じて、 α クラスタ、ヘリウム液滴、ハドロン化などを議論した。C01 班が進めた巨大質量比をもつエフィモフ 3 量体の研究 (B02 班の中性子ハローの研究とも関連)、C02 班が進めた ${}^6\text{Li}$ 原子気体を用いた量子シミュレータの開発とそれによるクラスター形成の実験研究につながった。

現在、成果とりまとめの段階に入っている。総括班の企画のもと、成果を論文集としてまとめることとした。すなわち、上記に示した戦略課題で得た成果を中心に、The European Physical Journal-A 誌(Springer Nature 社)において、Topical Article Collection (TAC) of EPJ A として出版すべく準備を進めている (EPJ-A 側と合意済)。計画研究代表、分担者の一部、公募研究代表一部が参加し、11 編の論文にまとめる予定であり、2024 年前半の出版を目指している。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

計画研究 A01 クォーク層とハドロン層を結ぶ動的機構を実現する高エネルギー原子核衝突を用いて、両階層の狭間に現れるダイクォークなどのセミ階層の挙動と階層分離に果たす役割を顕わにすべく、階層を跨ぐ量子多体系の普偏的理解に挑んできた。R3 年度までに ALICE 実験高度化の基幹部分の開発建設を主軸として完遂した。中央検出器系においては主飛跡検出器高度化のための大型電子検出器を、前方検出器系においては新規前方ミュオン粒子飛跡検出器の制御系を、開発・建設・導入した。併せてデータ収集系の革新的高速化と計算グリッド拠点整備を進めた。R4 年度に ALICE 実験第三期運転を開始し、高度化した検出器を用いて陽子相互衝突データと鉛原子核相互衝突の試験データを順調に取得した。

公募研究 A01 関連 **佐甲**核内 ϕ 中間子質量変化の研究のため $\phi \rightarrow K^*K$ 測定手法の確立を目指した。**高橋**電子・陽電子対測定による有限密度でのクォーク相関の研究のために飛跡検出器連続読み出しシステムを開発する。現状で利用可能な要素技術の選定を行い、仕様検討と開発を進めた。

計画研究 A02 J-PARC における大強度ハドロンビームによるバリオン分光実験、および SPring-8 における高輝度光子ビームを用いてエキゾチックハドロン探索・測定を行い、核子内有効自由度であるダイクォーク相関の確認、中間子バリオン (ハドロン分子) の観測から、有効自由度・分離度の導出を最終目標とする。J-PARC においては、大型スペクトロメーターの建設サブシステム、データ収集回路を完成させる。特に反 K 中間子に注目し、その基本相互作用 $K\bar{N}$ 相互作用研究を推進するとともに、反 K 中間子を含むハドロン分子状態である $\Lambda(1405)$ 、さらに K 中間子原子核 $K\text{-pp}$ の研究を進めた。SPring-8 における LEPS2 実験では、大型スペクトロメーターの建設を完了させ、較正のための陽子データの収集に続き、重水素標的を用いた $\Lambda(1405)$ および $K\text{-pp}$ 束縛状態の光生成実験を実施した。

公募研究 A02 関連 **石川**核子のカイラルパートナーの候補 $N(1535)$ の構造解明のため、 ηN に対して散乱長を評価。**加藤**チャームバリオンのスピン・パリティを測定し、励起構造を解明。**富田**排他的ドレルヤン反応測定のための μ 粒子検出器を開発。**白鳥**J-PARC 高計数率ハドロンビームによる Ξ, Ω 分光実験を可能にする測定器技術を開発。**宮林** $X(3872)$ 粒子の探索を目指し、Belle II 実験での発見可能性を解明。

計画研究 B01 (i) 高精度の Σp 散乱実験 (J-PARC E40) の実施を目指した。データ収集・解析・論文発表が終了し、 $\Sigma^+ p$ 散乱、 $\Sigma^- p$ 散乱の微分断面積を過去の約 100 倍の統計で求めることに成功した。(ii) H ダイバリオンの探索実験 (E42) を行い、その存否と性質の解明を目指した。超伝導電磁石と高計数率耐性をもつ大型飛跡検出器を開発し、予定通りのビーム量でデータ収集を完了した。データ解析を順調に進めている。(iii) ΣN 相互作用の研究のため、 Ξ ハイパー核分光実験 (E70) および Ξ 原子 X 線分光実験 (E03) の実施、エマルジョン実験 (E07) の Ξ 原子 X 線と Ξ ハイパー核に関する解析の推進を目指した。E70 実験は、新規 S-2S スペクトロメーターの設置と全検出器系の製作・準備が完了したが、J-PARC ビームタイム遅延のため実施は R5 年度に持ち越しとなった。E03 実験は鉄標的のデータ収集を終了し解析を進めている。エマルジョン実験 (E07) は画像解析が一段落し、 Ξ 原子 X 線は未観測ながらエマルジョン画像を用いた X 線研究法が確立し、また複数の新たな Ξ ハイパー核事象を観測した。(iv) K 中間子核の研究を展開するとしていたが、 ^{12}C 標的の過去データの解析により、K が核に極めて深く束縛した状態の存在を示唆した。(v) 軽い Λ ハイパー核の γ 線分光により ΛN 相互作用と核内 Λ の構造を調べる実験 (E63) を目指し、必要な検出器を開発した。

公募研究 B01 関連 **藤岡**ダブル Λ ハイパー核の分光実験に向け TPC の信号読み出しシステムを整備。**橋本**最も軽いハイパー核 $^3_\Lambda\text{H}$ や $^4_\Lambda\text{H}$ の寿命をカウンター実験で測定し、 ΛN 相互作用を検証。**市川**K 中間子原子核 $K\text{-pp}$ 、 $K\text{-ppp}$ 探索実験を J-PARC で行った。 Λ 粒子の同定等の基本的解析を終了し、詳細な物理解析を進めている。**本多**高統計の Λp 散乱実験を J-PARC で遂行するために必要なビーム TOF 検出器システムの開発を目指し、計画通り開発を完了。**仲澤**エマルジョン中にハイパー核を高効率で探索するため解析法の高度化を目指した。高度化を実現し、機械学習を取入れた探索法を確立、ストレンジネス $S=-2, -1$ のハイパー核探索を進めた。S=-2 事象、 Ξ ハイパー核の準位構造の観測に成功した。

計画研究 B02 (i) 多中性子クラスターの研究：中性子物質に出現が期待される 6n 系等の多中性子クラスターを、理研 RIBF において ^{11}Li の陽子準弾性散乱実験により探索する。実験に用いる反跳陽子検出器の

製作・準備を完了したが、RIBF 施設の事情により実験は R5 年度に持越しとなった。一方、 $2n, 4n$ 系について多中性子クラスターの実験的研究を進め、ハロー核におけるダイ中性子の証拠の獲得、テトラ中性子の観測、 ^{28}O の世界初観測などを達成。(ii-a) 少数核子系プローブによる三体核力の研究: 3 陽子間・3 中性子間の高精度測定により荷電スピン $3/2$ の三体核力を世界高感度で捉えることを目指す。 $p^3\text{He}$ 散乱のスピン観測量を高効率で測定する高偏極高密度 ^3He 標的を完成させ、阪大 RCNP、東北大 CYRIC において陽子・ ^3He 弾性散乱の高精度測定を実現した。荷電スピン $3/2$ 三体核力を示唆する結果を得た。(ii-b) (p, pN) 反応のスピン観測量の完全測定による核力の精密化: 三体核力の効果を持つ (p, pN) 反応のスピン観測量完全セットを測定し核媒質中での核力決定を目指す。また、核媒質中での核力として三体核力を含む g 行列を用い、反応断面積と中性子スキン厚が無矛盾に説明されることを明らかにした。

公募研究 B02 関連 **足立** ^{20}Ne における α 凝縮状態を探索する実験に向け粒子識別用 NTD 型シリコン検出器を開発。**堂園** 原子核の対相関が引き起こす新種の巨大対振動を探索。**川畑** 大立体角 Si 検出器に対し波形解析による粒子識別技術を確立、 $^{20}\text{Ne}, ^{24}\text{Mg}$ での α 凝縮状態の候補を発見した。

計画研究 C01 異なる質量比の系であるハドロンや原子核系の量子シミュレータとして、極めて大きな質量比を有する超低温原子混合系を実験的に生成し、特に、巨大質量比の系においてのみ現れる「普遍的なクラスター状態」としての角運動量を持った エフィモフ 3 量体 の観測可能性を探ることを目指した。本研究の結果、巨大質量比を有する超低温原子混合系を生成し、異種原子間のフェッシュバッハ共鳴を多数発見し、角運動量を持ったエフィモフ 3 量体の生成を示唆する重要な実験結果を得た。

また、B02 班・D01 班と連携し、藤田・宮沢型の原子核系 3 体力について、光格子中の少数原子系を対象として量子シミュレーションを行い、3 体力の振舞いを実験的に決定することを目指す。本研究の結果、フェッシュバッハ共鳴を用いた占有数分解超高分解能レーザー分光により 広範な相互作用領域で 3 体力エネルギーを実験的に決定するとともに、理論数値計算を遂行し定量的説明に成功した。

公募研究 C01 関連 **小林** 特異な 3 体共鳴エフィモフ状態の、冷却原子系での直接観測を行った。

計画研究 C02 「物質階層間の移り変わりはどのように起こるのか」という問題を、可変な引力相互作用を有するフェルミ原子気体を利用し、実験と理論の両サイドからその基礎物理と階層を貫く不変性を明らかにすることを目指す。C02 内の理論班はこの系の BCS-BEC クロスオーバー領域における 粘性率の相互作用依存性と温度依存性が原子階層と分子階層で質的に異なることを明らかにした。更に、階層変化に対するこの解釈が、QGP においても適用可能であることを指摘した。また高密度フェルミ物質における対相関の理論研究も順調に進み、新奇な三体量子クラスター形成を伴うハドロン・クォーククロスオーバーの理論提案ができた。実験班は理論予測の検証のため極低温 ^6Li 原子気体を用いた量子シミュレータを開発した。散乱長が発散しているユニタリー極限において状態方程式の評価を行い、そこから 4 体系の物理情報を含む 4 次のビリアル係数の評価や圧縮率や比熱の温度依存性を示すことができた。実験状況を考察することで原子核のように殻構造内でのクラスター形成に近い環境が実現されている可能性が示唆され、新たな量子シミュレーションの方向性が示された。

公募研究 C02 関連 **堀内** 宇宙環境、中性子核物質中におけるクラスター形成を物理的・化学的手法により定量化。**竹内** 量子渦とのアナロジーを持つ液晶のトポロジカル欠陥の構造を直接測定した。

計画研究 D01 ハドロン、原子核、原子、分子の領域に跨った「物質階層の進化のメカニズム」を理論的に解決することを D01 班の目的とする中で、分担者内での共同研究および連携を目指す。「クラスター」をキーワードとした定期的な戦略会議や国際レクチャーによって多角的な議論を行った。その結果、構成要素の (セミ階層) クラスター形成機構、クラスター間の相互作用、さらに多体クラスターが作る上の階層で発現する多体系に至るまでの理論的な手法の道筋をつけることができた。

公募研究 D01 関連 **浅川** QCD 相図・臨界点探索におけるオープンチャーム粒子の意義を明らかにした。

遠藤 相互作用の強い量子 3 体系や多体系を探り、原子核から冷却原子にわたる普遍的挙動を解明。**大塚** α クラスター構造を第一原理計算によって解明。**岡** ハドロン中のカラーを持つクラスターの役割を有効理論により解析、新規現象を発見。**萩野** 重い原子核のクラスター崩壊の微視的理解を目指し、生成座標法に基づくアプローチを開発。**緒方** 弱束縛/非束縛クラスターノックアウト反応を記述する理論を構築し、重陽子やダイニュートロンが原子核のサブユニットたり得るかを解明。**木村** 軽核の光核反応断面積と崩壊モードを系統的に求めた。質量数大の sd-pf 殻核について研究を進めた。**船木** ^{20}Ne 励起状態での α 凝縮相の存否を複数のクラスターモデルにより明らかにした。**山下** ポジトロニウムが原子と結合した際にどのような部分系を維持し、どのように解離するかを明らかにするため、基本的な系である水素化ポジトロニウムについて精密計算した。**江尻** 格子 QCD の第一原理計算により高密度領域で QCD 相転移の

性質が変化する臨界点の決定を目指した。**兵藤** 閾値近傍に現れる状態の構造を記述する一般的な枠組みを構築することを目標とした。ハドロン物理で得られた知見を起点として階層性を横断する物理を展開した。**立川**量子モンテカルロ法・経路積分法を駆使、エキゾチック分子系に対する第一原理手法を構築し、具体的な計算を実施。**中務**低エネルギー核反応と核構造とを統一的に記述することで、原子核の低エネルギーダイナミクス、特にクラスター生成における量子揺らぎが果たす役割の解明を目指した。**大西**高エネルギー反応で生ずるハドロン対の相関関数から未知のハドロン間相互作用を解明。**鹿野**非平衡過程で実現される結合クラスター法による量子シミュレーションを実現。

(2) 本研究課題により得られた成果

計画研究 A01 LHC 加速器の輝度向上などを目的とする運転休止期間を有効活用し、主飛跡検出器高度化、新規前方ミュオン粒子飛跡検出器導入、データ収集系高速化を完了し、ALICE 実験高度化を完遂しつつ既存データからの物理導出を進めた[A01-1-7]。日本グループは基幹部分を網羅し、国際協力体制において中心的な地位を確保しつつ、密接かつ円滑な協力体制の一層の強化を進めた。中央検出器系高度化においては、データ収集の 2 桁高速化のため、大型ガス電子増幅器を主飛跡検出器に導入設置した。前方検出器系高度化においては、新規半導体ミュオン粒子飛跡検出器の導入・設置・立上調整を完遂した。データ収集系高度化においては、オンラインとオフラインを統合したデータ収集系の高度化を進めた。加えて、計算グリッド拠点整備においては、計算能力、データ蓄積容量、ネットワーク速度など各種資源の最適化を継続し、地球規模の計算グリッドを用いる ALICE 実験データ処理に対する日本グループの貢献を維持拡大した。ALICE 実験第三期運転を開始し、高度化した検出器を用いて陽子相互衝突データと鉛原子核相互衝突の試験データを順調に取得した。

公募研究 A01 関連 **佐甲**実験計画を J-PARC に提案し Stage-1 採択された。耐高レート MRPC を開発し 70ps の時間分解能を達成し、エアロゲルチェレンコフ検出器を設計した。**高橋**ALICE 実験の TPC 検出器読出しに使用されている SAMPA チップを使った小型連続読出し回路の開発を進めた。これは GEM 検出器や TPC 検出器を使用する J-PARC, LEPS2, RCNP, RIBF の実験におけるデータ収集性能向上に貢献する。

計画研究 A02 K 中間子-核子のハドロン分子状態とされる $\Lambda(1405)$ の質量スペクトルを J-PARC における $K+d$ 反応実験により導出した。この反応過程を散乱理論に従って分析し $\Lambda(1405)$ の質量を決定した。これは、 $\Lambda(1405)$ が K 中間子と陽子の散乱における共鳴状態(ハドロン分子)であることを実験的に直接示したものである[A02-1]。また、K 中間子と 2 つの核子系である K_{pp} 状態を J-PARC における $K+^3\text{He}$ 原子核反応実験で発見した[A02-3,7]。これは、核媒質中では中間状態(仮想状態)としてのみ現れる中間子が、原子核中で構成要素として存在しているという、「中間子原子核」が生成されたと解釈できる。また、チャームバリオン分光実験[A02-10]に必要な高計数率でデータ収集が実現できるデータ収集システムを開発、その性能を確認した[A02-4]。SPRING-8/LEPS2 実験では、スペクトロメーターの建設が完了し、検出器較正を目的とした陽子標的によるハドロン光生成実験を実施、初期的な実験結果を国際会議等で公表した[A02-8,9]。K-pp 束縛状態の光生成、 $\Lambda(1405)$ 精密測定、反ストレンジクォークを 1 つ含むエキゾチックバリオン、ペンタクォーク粒子探索のための重水素標的による実験を進めている。

公募研究 A02 関連 **石川** η_N 散乱の寄与を露わに含む最適な運動学での $\gamma d \rightarrow \eta pn$ 反応、および $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ 反応の解析で、 η_N 散乱長が短いことを示した[A02-10]。**加藤**チャームバリオンのスピン・パリティを測定し、励起構造を明らかにした[A02-13]。**富田**約 100 ps の高時間分解能と約 1mm の位置分解能を合わせ持つ μ 粒子検出器の開発に成功。**白鳥**高精細チェレンコフタイミング検出器の開発に成功。0.5mm 幅のセグメントにおいて 45ps という当初想定を上回る高時間分解能を得た。**宮林**軽クォーク対生成事象の背景事象を低減する工夫により、Belle II 実験により有意な信号が期待できることがわかった。

計画研究 B01 (i) $\Sigma^+ p$ 散乱実験(J-PARC E40)の結果、 $\Sigma^+ p$ 弾性・非弾性散乱と $\Sigma^+ p$ 弾性散乱それぞれの微分断面積を過去の約 100 倍の統計で決定し、3 編の論文発表と 2 回のプレスリリース、多数の国際会議発表を行った[B01-2,3,5]。特に $\Sigma^+ p$ 散乱では位相差解析をハイペロン散乱では初めて行い、核力より強い斥力芯の存在を実証した[B01-3]。核力の斥力芯の起源は謎であったが、今回の成果は、クォーク間パウリ効果が斥力芯の起源の一つであるとする理論予想を裏付けるものである。また、得られた微分断面積データをもとに、カイラル有効場理論によるバリオン間相互作用モデルの改良が海外の理論家によって進められることとなった。(ii) H ダイバリオンの探索実験のために超電導電磁石と高計数率耐性をもつ大型飛跡検出器(HypTPC)の開発に成功し、論文や国際会議での発表を行った[B01-1]。(iii) エマルジョンを用いた Ξ 原子 X 線分光実験は、バックグラウンドを従来方法の 1/170 に減少させることに成功し、この

新手法の確立について論文発表した[B01-5]。さらに $^{15}\epsilon\text{C}$ ハイパー核事象を複数観測してそれらの Ξ 束縛エネルギーを高精度で決定し、核内 Ξ の引力の大きさを求めることができた [B01-6,7]。(iv) $^{12}\text{C}(K^-, p)$ 反応の包括スペクトル(E05)を解析し、A02 班が発見した K^{pp} 核の束縛状態に相当するものとは別に Λ (1405)が束縛したと解釈できる深い K 原子核の束縛状態の存在を示した[B01-8]。

公募研究 B01 関連 **藤岡** TPC を用いて宇宙線による直線飛跡の再構成に成功し、読出し系の動作を確認した。**橋本** K^- ビームの He ハイパー核生成手法を確立し、 $^4\Lambda\text{H}$ の寿命の高精度測定結果の論文を投稿した。

市川 K^{pp} , K^{ppp} 探索の物理データ取得に成功し、先駆的結果を研究会で報告した。**本多** CDM に基づいた新しいクロック分配システム(MIKUMARI)、連続読み出し型 FPGA HR-TDC、およびアクリル輻射体ベースの TOF 検出器を開発した[B01-13]。**山本** 装置開発を完了し、R5 年度の物理データの取得に向けた準備を完了。**仲澤** エマルジョンを用いたダブルハイパー核実験(E07,E373)について、画像解析の 10 倍速化を実現、機械学習の導入による高効率のハイパー核探査を可能にした。その結果、 Be 核の $\Lambda\Lambda$ ハイパー核事象、 $^{15}\epsilon\text{C}$ 事象[B01-6,7]を観測し、後者では Ξ の束縛エネルギーが高精度で初めて決定され、 Ξ ハイパー核内の準位構造を初観測した。これらの業績により 第 66 回仁科記念賞(2020 年度) を受賞。

計画研究 B02 (i) 多中性子クラスターの研究：二中性子ハロー核 ^6He , ^{19}B の分解反応実験[B02-6,8]からダイ中性子の証拠を示し、純中性子原子核、テトラ中性子の共鳴状態の観測に成功した[B02-4]。また、世界初の 4 中性子同時測定法を確立し[B02-9]中性子クラスター候補 ^{28}O の観測に成功した[B02-1, Nature 誌掲載予定]。一方、6 中性子クラスター探索実験のため反跳陽子検出器を完成させた[B02-2]。RIBF での実験は R5 年度に予定している。(ii-a) 少数核子系プローブによる三体核力の研究：縦偏極型偏極標的を完成し、RCNP、CYRIC にて中間エネルギー領域における陽子・ ^3He 弾性散乱の高精度測定を実現した。厳密理論計算と比較、同散乱からは、三核子系散乱とは異なる核力の情報が得られることがわかった[B02-7]。特に、スピン相関係数から、藤田宮沢型、および荷電スピン 3/2 に敏感な三体力の情報が得られることが判明した。こうした業績により関口(分担)は紫千代萩賞(R1 年度)、第 42 回猿橋賞(R4 年度) を受賞。(ii-b) (p, pN) 反応のスピン観測の完全測定による核力の精密化：RCNP での実験からフェルミ面近傍(媒質効果小)の軌道に対し分光学的因子を導出、(p, pN) 反応法の確度の高さを証明した。反跳陽子偏極度計を完成し、偏極効果を含むシミュレータ開発に成功した。一方、三体核力を含む媒質効果を取り入れることで、反応断面積と中性子スキン厚を定量的に理解できることを示した[B02-3]。

公募研究 B02 関連 **足立** 励起核からの低エネルギー崩壊粒子に対し、開発した NTD 型シリコン検出器群の波形信号を用いた粒子識別が可能であることを確認した。**堂園** $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ 実験を行い(新反応)、対振動状態候補を発見した。**川畑** ^{20}Ne , ^{24}Mg における α 凝縮状態の有力候補を発見した [B02-13]。

研究計画 C01 Er 原子と Li 原子、Yb 原子からなる約 100nK 領域の超低温混合気体の生成に成功した。特に、磁性原子 Er と非磁性原子 Yb のボース凝縮混合系を生成することに初めて成功した[C01-3]。また、Er-Li 原子の超低温混合系に対してフェッシュバツハ共鳴を多数観測することに成功した[C01-5]。特に 455 G の共鳴を詳しく調べ、エフィモフ 3 体状態の生成を示唆する重要な結果を得ることができた[C01-1]。また、Yb 原子の異なる電子軌道間フェッシュバツハ共鳴を用いて、光格子中原子に対して占有数分解超高分解能レーザー分光実験を遂行し、藤田宮沢型とみなせる摂動領域からこれまで未解明な非摂動領域にわたる広範な相互作用領域で、3 体力のエネルギーを実験的に決定することに成功した。また、3 体系の理論数値計算を遂行し、非摂動領域で実験結果をよく説明する外挿曲線を見出した。本研究は、B02・D01 班との本新学術領域内での協力・有益な議論によって初めて実現した研究成果である。こうした冷却原子量子シミュレーション研究に対し計画研究代表(高橋)は R2 年秋の紫綬褒章を受章した。

公募研究 C01 関連 **小林** エフィモフ状態生成の本実験に向け、光共振器増幅された光格子を活用した新しい原子冷却手法を開発し、量子縮退温度に迫る原子冷却を実現した[C01-11,12]。

計画研究 C02 冷却フェルミ原子気体の BCS-BEC クロスオーバー領域における粘性率[C02-3]と等温圧縮率[C02-1]を、自己無撞着 T 行列理論により理論的に評価した。粘性率の相互作用依存性と温度依存性からは原子階層と分子階層の境界が見積もられること、また等温圧縮率の温度依存性には分子間にはたらく 3 体相互作用の影響が顕著に現れることを明らかにした。また、3 粒子から構成される複合粒子との関連でクーパートリプル発現によるクォーク・ハドロンクロスオーバーについての理論研究を行った[C02-2]。現実の 3 カラーを単純化した 2 カラーの格子 QCD 計算を通じて、クロスオーバー領域における音速のふるまいやハドロン質量の性質を第一原理的に明らかにした。上記の理論研究を実証するための冷却原子を用いた量子シミュレータが完成し、等温圧縮率や定積比熱が、超流動転移温度や量子クラスター形成

領域で理論通りの特徴的な振る舞いを示すことを確認し、状態方程式から階層変化の様子をプローブできることを示した。

公募研究 C02 関連 **堀内**熱プラズマ中、希薄中性子物質中における α クラスタ形成への媒質効果を定量化し、その元素合成過程への影響に関する知見を得た[C02-12]。

計画研究 D01(i)クォーク模型を厳密な少数計算法により $sssqq^*$ ペンタクォークに共鳴状態が存在することを予言、その存在には $ssq-sq^*$ のような部分クラスタ相関が重要であることを示した[D01-7]。さらに、LHC で報告されたペンタクォークバリオン P_c , P_{cs} をハドロン・クォーク複合模型によって寿命と質量を説明した[D01-4]。ここでも部分クラスタ間の長距離相関と、近距離のクォーククラスタ相関の重要性を明らかにした。(ii) HAL 法によりハイペロン間相互作用を構築することによって、 $N\Omega$ (準)束縛状態を予言[D01-10]、H ダイバリオンの非束縛・ $N\Xi$ 閾値近傍でのポール構造を解明した[D01-6]。(iii) (ii)で得られた Ξ -核子間相互作用を用い、未発見グザイハイパー核 $NNN\Xi$ の束縛状態を予言し実験を提案[D01-3]、プレスリリースを行った。これは B01 班との共同研究によりなされたものである。このようにクラスタ構成要素からクラスタ形成する枠組みの基礎を築いた。この成果は中性子星や状態方程式の問題解決の基盤となる。(iv)ダイポール励起モードに適した核構造模型を開発し、 α 非弾性散乱、陽子非弾性における断面積を計算、クラスタ励起による寄与を明らかにした[D01-8,9]。(v)量子分子動力学法を進展させ「水素+重水素混合系において、拡散係数をはじめとするダイナミクスが特に抑制される特別な混合比が存在する」という非自明な予言を行ない、凝縮系水素超流動の実現に向けて最適な混合比の提案を行った[D01-5]。代表(肥山)は科学技術分野の文部科学大臣表彰(H31)を受賞。また P_c , P_{cs} の研究に加わった山口は日本物理学会若手奨励賞(R3)を受賞。

公募研究 D01 関連 **浅川**臨界点近傍の重クォークの運動量拡散係数は、臨界点が属する動的臨界現象のユニバーサリティクラスに依ることを明らかにした。**遠藤**原子核と冷却原子のエフィモフ状態を探り、普遍的挙動をする領域を解明。またユニタリーフェルミ気体の4次ビリアル係数を質量インバランス系で正確に得た。原子と原子核の変形の違いを比較する階層横断的研究も行った[D01-26](**公募萩野との共同研究**)。**大塚**Be 同位体及び ^{12}C 核に対し、特に ^{12}C 核では基底状態やホイル状態まで含めて、クラスタ構造と通常の核物質的構造が核力によってどのように現れるかを明らかにした[D01-16]。**フンボルト賞(独)受賞(2023)**。**岡**軽クォーク2個からなるダイクォークのカイラル有効理論による解析を行い、ダイクォークのカイラルパートナー構造と軸性 $U(1)$ アノマリーの効果がチャームバリオンのスペクトルに新しい現象を与える可能性を指摘した[D01-17,30]。**萩野** ^{222}Rn などのクラスタ崩壊現象の実験データをよく再現する微視的理論の構築に成功[D01-18]。**緒方**反応模型「離散化チャネルインパルス近似」を新たに構築、弱束縛/非束縛クラスタの存在率と当該ロックアウト反応データとの関係を明らかにした[D01-19]。**木村**複数の密度汎関数により、軽核の光核反応断面積を求め、それを用いて宇宙線の伝搬計算を行い、そのエネルギースペクトルへの影響を示した[D01-14]。**船木** α 凝縮型の微視的クラスタ模型により、 ^{20}Ne の励起状態に 5α 凝縮構造状態が存在することを明らかにした。**山下**従来定性的理解だった水素化ポジトロニウムの第二束縛状態に対し、解離光スペクトルから部分系の構造が観測できることを指摘、従来予想されていなかった共鳴構造変化に伴う発光線を発見。この系の衝突過程の研究から部分系の構造変化に関わる断面積を導いた[D01-20](**D01 肥山との共同研究**)。**中務**慣性性能率やクラスタ生成前後の相対運動に対する集団質量を微視的に解析、形状変化からクラスタ相対運動への転移が速やかに実現すること、量子力学的要請を満たすため慣性性能率が変形とともに減少するなど直感とは異なる現象の出現を示した[D01-21]。**江尻**高密度での粒子密度揺らぎを格子 QCD で数値計算する方法を提案。また、クォークが重い領域にある臨界点について研究した[D01-27]。グラディエントフロー法による QCD の熱力学量の計算も実施。**兵藤**状態の複合性を弱束縛関係式で評価する方法の有限レンジ補正を検討し、エキゾチックハドロン、ハイパー核、原子系で弱束縛状態の構造を議論した[D01-22]。**立川**量子モンテカルロ法、経路積分法を駆使し、エキゾチック分子系に対する第一原理手法を構築、ミューオニウム化合物や陽電子化合物の高精度計算実施[D01-31]。**肥山(D01 代表)らの計算手法の応用**にも成功。**第4回分子科学国際学術賞**を受賞。**鹿野**結合クラスタ法の拡張事例となる量子コンピュータのアルゴリズムおよびそのノイズ耐性に関して調査した。また、既存のノイズモデル構築法ではなく統計学的手法を用いたモデルを構築。**大西**開発した誤差評価方法を用いてデータを分析、QCD で得られた Ω_N 相互作用を検証し、相関関数が Ω_N 束縛状態の存在を論じた。pK-相関関数についても結果を得た[D01-28] (**公募兵藤との共同研究**)。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況(主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和5年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。)について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者(発表当時、以下同様。)には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

総括班 X00 -【主催シンポジウム】

X00-1. International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2022) (Oct. 31- Nov. 3 2022, Sendai, Japan)

X00-2. International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020) (Jan. 23-24, 2020 , Beppu, Japan)

計画研究 A01 -【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 209 報)

(A01 班: ALICE/PHENIX Collaboration では corresponding author は board が担うので*印を省略)

A01-1. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Measurement of anti-³He nuclei absorption in matter and impact on their propagation in the Galaxy Scattering studies with low-energy kaon-proton femtoscopy in proton-proton collisions at the LHC”, *Nature Phys.* **19**, 61-71 (2023). 査読有

A01-2. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Direct observation of the dead-cone effect in quantum chromodynamics”, *Nature* **605**, 440-446 (2022). 査読有

A01-3. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC”, *Nature* **588**, 232-238 (2020). 査読有

A01-4. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Scattering studies with low-energy kaon-proton femtoscopy in proton-proton collisions at the LHC”, *Phys. Rev. Lett.* **124**, 092301(2020). 査読有

A01-5. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Measurement of $\Upsilon(1S)$ elliptic flow at forward rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 192301 (2019). 査読有

A01-6. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “First Observation of an Attractive Interaction between a Proton and a Cascade Baryon”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 112002 (2019). 査読有

A01-7. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), “Investigations of Anisotropic Flow Using Multiparticle Azimuthal Correlations in pp, p-Pb, Xe-Xe, and Pb-Pb Collisions at the LHC”, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 142301 (2019). 査読有

-【学会発表】(H30-R4 年度: 142 件、内国際学会 60 件、招待講演 75 件)

A01-8. K.Shigaki, “Heavy Ion Physics in the Future in the Highest Energy Regime”, Korean Physics Society symposium (2018/10/25, Changwon, South Korea). 招待講演

- 【アウトリーチ】

A01-9. 志垣賢太, 「宇宙の始まり, 物質の謎, 重さの起源 - クォーク・グルーオン・プラズマの物理 - 」量子クラスターオンライン科学講演会、2022年1月8日

公募研究 A01 関連 -【学会発表、雑誌論文】

A01-10. I.W. Park, H.Sako, K. Aoki, P. Gubler, and S.H. Lee, “Disentangling longitudinal and transverse modes of the phi meson through dilepton and kaon decays”, *Phys. Rev. D* **107**, 074033 (2023). 査読有

計画研究 A02 -【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 50 報)

A02-1. S. Aikawa, T. Nagae, *H. Noumi, H. Ohnishi, *et al.* “Pole position of $\Lambda(1405)$ measured in $d(K^-, n)\pi\Sigma$ reactions” *Phys.Lett.B* **837**, 137637 (1-8) (2023). 査読有 B01 との共著

A02-2. *T. Hashimoto, H. Noumi, H. Ohnishi, *et al.*, “Measurements of Strong-Interaction Effects in Kaonic-Helium Isotopes at Sub-eV Precision with X-Ray Microcalorimeters”, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 112503(2022). 査読有

A02-3. *T. Yamaga, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, *et al.*, “Observation of a $K\bar{K}n$ bound state in the $^3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$ reaction”, *Phys. Rev. C* **102**, 044002. 査読有 B01 との共著

A02-4. *R. Honda, H. Noumi, *et al.*, “Continuous timing measurement using a data-streaming DAQ system”, *Prog. Theo. Exp. Phys.*, **2021**, 12, 123H01(2021). 査読有 B01 との共著

A02-5. *H. Ohnishi, *F. Sakuma and T. Takahashi, “Hadron Physics at J-PARC”, *Prog. Part. Nucl. Phys.* (2020)

103773. 招待レビュー記事, 査読有 **B01 との共著**

A02-6. *N. Muramatsu, J.K. Ahn, W.C. Chang, H. Ohnishi, M. Yosoi, *et al.*, “Measurement of neutral pion photoproduction off the proton with the large acceptance electromagnetic calorimeter BGOegg”, Phys. Rev. C **100**, 055202 (2019). 査読有

A02-7. *S. Ajimura, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, *T. Yamaga *et al.*, “ K^-pp ”, a Kbar-Meson Nuclear Bound State, Observed in $^3\text{He}(K^-\Lambda p)n$ Reactions”, Phys. Lett. B **789**, 620 (2019). 査読有 **B01 との共著**

-【学会発表】(H30-R4 年度:181 件、内国際学会 92 件、招待講演 104 件)

A02-8. S.Y. Ryu “Hadron physics with polarized photons at LEPS/LEPS2”, EMMI Workshop on New Vistas in Photon Physics in Heavy-Ion Collisions, 2022.9.19-22, Krakow, Poland. 招待講演

A02-9. H. Noumi, “Studies of excited baryons with heavy flavors at J-PARC”, APCTP WS on Nuclear Physics 2022: Phys. of Excited Hadrons in the Present and Future Facilities, Jeju, Korea, July, 2022. 招待講演

公募研究 A02 関連 -【雑誌論文】

A02-10. *T. Ishikawa, *et al.*, “Coherent photoproduction of the neutral-pion and η -meson on the deuteron at incident energies below 1.15 GeV”, Phys. Rev. C **105**, 045201 (2022). 査読有

A02-11. *T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, Q. He, *et al.*, “Resonance-like structure near the ηd threshold in the $\gamma d \rightarrow \pi^0 \eta d$ reaction”, Phys. Rev. C **104**, L052201 (2021). 査読有

A02-12. *T. Ishikawa, *et al.*, “An scattering parameters and possible ηd bound state from η photoproduction on the deuteron”, Acta Phys. Polon. **51**, 27 (2020). 査読有

A02-13. T. J. Moon, Y. Kato *et al.* (Belle Collaboration), First determination of the spin and parity of the charmed-strange baryon $\Xi_c(2970)^+$, Phys. Rev. D **103**, L111101(2021). 査読有

A02-14. K. Chilikin, K. Miyabayashi, *et al.* (Belle collaboration), “First search for the $h_{c2}(1D)$ in B decays at Belle” JHEP2005, 034 (2020 May 08). 査読有

A02-15. *K. Shirotori, “Hadron spectroscopy with high-momentum hadron beams”, JPS Conf. Proc. **33** (2021) 011115, 10.7566/JPSCP.33.011115 査読有

計画研究 B01 -【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 55 報)

B01-1. *J. K. Ahn, T. Takahashi *et al.*, “Superconducting dipole magnet for Hyperon spectrometer”, Nucl. Instrum. Meth. A **1047**, 167775 (2023) 査読有.

B01-2. *K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura *et al.*, “Precise measurement of differential cross sections of the $\Sigma^+ p \rightarrow \Lambda n$ reaction in momentum range 470-650 MeV/c”, Phys. Rev. Lett. **128**, 072501 (2022) 査読有

B01-3. *T. Nanamura, K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura *et al.*, “Measurement of differential cross sections for $\Sigma^+ p$ elastic scattering in the momentum range 0.44–0.80 GeV/c”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 093D01 (2022) 査読有.

B01-4. *M. Fujita, H. Tamura *et al.*, “ Ξ^- atomic X-ray spectroscopy using a counter-emulsion hybrid method”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2022**, 123D01 (2022) 査読有.

B01-5. *K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura, *et al.*, “Measurement of the differential cross sections of the $\Sigma^+ p$ elastic scattering in momentum range 470 to 850 MeV/c”, Phys. Rev. C **104**, 045204 (2021) 査読有.

B01-6. *S. Hayakawa, T. Takahashi, H. Tamura *et al.*, “Observation of Coulomb-Assisted Nuclear Bound State of $\Xi^- - ^{14}\text{N}$ System”, Phys. Rev. Lett. **126**, 062501 (2021) 査読有.

B01-7. *M. Yoshimoto, T. Takahashi, H. Tamura *et al.*, “First observation of a nuclear s-state of a Ξ hypernucleus, $^{15}_{\Xi}\text{C}$ ”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 7 (2021).

B01-8. *Y. Ichikawa, K. Miwa, T. Nagae, T. Takahashi, H. Tamura *et al.*, “An event excess observed in the deeply bound region of the $^{12}\text{C}(K^-, p)$ missing-mass spectrum”, Prog. Theor. Exp. Phys **2020**, 123D01 (2020) 査読有.

- 【学会発表】(H30-R4 年度:173 件、内国際学会 87 件、招待講演 76 件)

B01-9. H. Tamura, “Strangeness Nuclear Physics”, The 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, (2018/11/13-17, Tsukuba Japan) 招待講演

B01-10. T. Nagae, “ Ξ hypernuclei at J-PARC”, Few-Body 22 Conference, (2018/7/9-13, CAEN, France) 招待講演
- 【アウトリーチ】

B01-11. 田村裕和, 「物質の常識をくつがえす中性子星のサイエンス」量子クラスターオンライン科学講演会、2020 年 8 月 8 日

公募研究 B01 関連 -【雑誌論文】

B01-12. *H. Fujioka *et al.*, “Production of light Ξ -hypernuclei, $7\Xi\text{H}$ ” EPJ Web Conf. **271**, 03004 (2022). 査読有

B01-13. *R. Honda, “New Clock Distribution System Based On Clock-Duty-Cycle-Modulation For Distributed Data Acquisition System”, IEEE Trans. Nucl. Science, DOI 10.1109/TNS.2023.3265698. (In press) 査読有.

B01-14. *T.O. Yamamoto et. al, X-ray spectroscopy experiments on exotic Xi atoms at J-PARC, PoS 380 (2022) 211. DOI: 10.22323/1.380.0211 査読有.

B01-15. *H. Ekawa, K. Nakazawa et al., “Observation of a Be double-Lambda hypernucleus in the J-PARC E07 experiment”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 021D02 (1-11) (2019) 査読有.

B01-16. *Nakazawa, K., “Experimental Aspect of $S = -2$ Hypernuclei”, In: Tanihata, I., Toki, H., Kajino, T. (eds) *Handbook of Nuclear Physics*, Springer, Singapore (2023). 査読有

計画研究 B02 -【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 97 報)

B02-1. *Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “First Observation of ^{28}O ”, Nature, *Accepted* (2023). 査読有

B02-2. *H.N.Liu, Y.Kondo, T.Nakamura, et al., “STRASSE: A Silicon Tracker for Quasi-free Scattering Measurements at the RIBF”, Eur. Phys. J. A **59**, 121 (26p) (2023). 査読有

B02-3. *T. Wakasa, et al., “Neutron-skin values and matter and neutron radii determined from reaction cross sections of proton scattering on ^{12}C , $^{40,48}\text{Ca}$, ^{58}Ni , and ^{208}Pb ”, Phys. Rev. C **107**, 024608 (2023). 査読有

B02-4. *M. Duer, Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “Observation of a correlated four-neutron system”, Nature **606**, 678-682 (2022). 査読有

B02-5. *A. Watanabe, S. Nakai, K. Sekiguchi, et al., “Spin correlation coefficient for proton- ^3He elastic scattering at 100 MeV”, Phys. Rev. C **106**, 054002 (1-9) (2022). 査読有

B02-6. *Y.L. Sun, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Three-body breakup of ^6He and its halo structure”, Phys. Lett. B **814**, 136072 (1-8) (2021). 査読有

B02-7. *A. Watanabe, S. Nakai, Y. Wada, K. Sekiguchi, et al., “Proton- ^3He elastic scattering at intermediate energies”, Phys. Rev. C **103**, 044001 (1-9) (2021). **Editors’ Suggestion** 査読有

B02-8. *K.J. Cook, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Halo Structure of the Neutron-Dripline Nucleus ^{19}B ”, Phys. Rev. Lett. **124**, 212503 (2020). **Editors’ Suggestion** 査読有

B02-9. *Y. Kondo, T. Tomai, T. Nakamura, “Recent progress and developments for experimental studies with the SAMURAI spectrometer”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **463**, 173-178 (2020), 査読有

B02-10. *K. Sekiguchi, “Experimental approach to three-nucleon forces via three- and four-nucleon scattering”, Few-Body Systems **60**, pp.56:1-5 (2019). 査読有

- 【学会発表】(H30-R4 年度: 142 件、内国際学会 69 件、招待講演 55 件)

B02-11. Takashi Nakamura, “Exploring neutron-rich extremes of the nuclear landscape”, UK Nuclear Physics Conference (IOP), (2023/4/4-6, York, UK. 招待講演

B02-12. K. Sekiguchi, “Exploring Three-Nucleon Forces via Three- and Four-Nucleon Scattering”, the 24th European Conference on Few Body Problems in Physics, (2019/9/2-6, Guilford, United Kingdom) 招待講演

公募研究 B02 関連 -【雑誌論文】

B02-13. *S. Adachi, T. Kawabata et al., “Candidates for the 5α condensed state in ^{20}Ne ”, Phys. Lett. B **819**, 136411 (2021). 査読有

計画研究 C01 -【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 45 報)

C01-1. *F. Schäfer, Y. Haruna, *Y. Takahashi, “Observation of Feshbach Resonances in an ^{167}Er - ^6Li Fermi-Fermi Mixture”, J. Phys. Soc. **92**, 054301 (1-4) (2023). 査読有

C01-2. T. Ishiyama, *K. Ono, T. Takano, A. Sunaga, and Y. Takahashi, “Observation of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms”, Phys. Rev. Lett. **130**, 15, 153402(1-6)(2023). 査読有

C01-3. *F. Schäfer, Y. Haruna, and *Y. Takahashi, “Realization of a quantum degenerate mixture of highly-magnetic and nonmagnetic atoms”, Physical Review A, **107**, L031306(1-5) (2023). 査読有

C01-4. *K. Ono, Y. Takahashi, et al., “Observation of Nonlinearity of Generalized King Plot in the Search for New Boson”, Phys. Rev. X, **12**, 2, 021033 (1-17) (2022). 査読有

C01-5. *F. Schäfer, N. Mizukami, and Y. Takahashi, “Feshbach resonances of large-mass-imbalance Er-Li mixtures”, Phys. Rev. A, **105**, 012816(1-7)(2022). 査読有

C01-6. *K. Ono, T. Higomoto, Y. Saito, S. Uchino, Y. Nishida, and Y. Takahashi, “Observation of spin-space quantum transport induced by an atomic quantum point contact”, Nature Com. **12**, 6724(1-8) (2021). 査読有

- 【学会発表】(H30-R4 年度: 134 件、内国際学会 61 件、招待講演 42 件)

C01-7. Y. Takahashi, “Quantum simulation using ultracold ytterbium in an optical lattice”, US-Japan QELS-13 (the 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy) (2018/9, Kanazawa, Japan) 招待講演

C01-8. Y. Takahashi, “Quantum magnetism of ultracold ytterbium Fermi gases in an optical lattice”, 7th International Workshop on Ultra-cold Group II Atoms (2018/09, Beijing, China) 招待講演

- 【アウトリーチ】

C01-9. 2019年9月15日：京大アカデミックディ 2019「研究者と立ち話」レーザー冷却で作る超低温原子の世界 高橋義朗

公募研究 C01 関連 -【学会発表】

C01-10. J. Kobayashi, “Test for the stability of the electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules”, 12th Int. Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020) 招待講演 (2020/01/9-10 RIKEN, Japan)

計画研究 C02 -【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 51 報)

C02-1. *D. Kagamihara, H. Tajima, Y. Ohashi, et al. “Isothermal compressibility and effects of multibody molecular interactions in a strongly interacting ultracold Fermi gas”, Phys. Rev. A **106**, 033308 (2022). 査読有

C02-2. *H. Tajima, S. Tsutsui, T. M. Doi, and K. Iida, “Cooper triples in attractive three-component fermions: Implication for hadron-quark crossover,” Phys. Rev. Research **4**, L012021 (2022).

C02-3. *D. Kagamihara, Y. Ohashi, “Kovtun-Son-Starinets conjecture and Effects of Mass Imbalance in the Normal State of an Ultracold Fermi Gas in the BCS-BEC Crossover Region”, J. Phys. Soc. Jpn. **89** (2020), 044005. 査読有

C02-4. *Y. Ohashi, H. Tajima, and Pieter van Wyk, “BCS-BEC crossover in cold atomic and in nuclear systems”, Progress in Particle and Nuclear Physics **111**, 103739 (2020). 査読有

C02-5. *K. Iida, E. Itou, and T.-G. Lee, “Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density”, J. of High Energy Physics 2020, **181**(1-21) (2020). 査読有

C02-6. D. Kagamihara, D. Inotani, and *Y. Ohashi, “Shear Viscosity and Strong-Coupling Corrections in the BCS-BEC Crossover Regime of an Ultracold Fermi Gas”, J. Phys. Soc. Jpn **88**, 114001(10),2019. 査読有.

C02-7. J. Takahashi, R. Imai, E. Nakano, and *K. Iida, “Bose polaron in spherical trap potentials: Spatial structure and quantum depletion”, Phys. Rev. A **100**, 23624(1-9) (2019). 査読有

C02-8. *M. Horikoshi and M. Kuwata-Gonokami, “Cold Atom Quantum Simulator for Dilute Neutron Matter”, International Journal of Modern Physics E, **28**, 1930001 (2019). 査読有

- 【学会発表】 (H30-R4 年度: 174 件、内国際学会 52 件、招待講演 32 件)

C02-9. M. Horikoshi, “Study of excited cluster states using Feshbach molecules”, ECT* workshop “Universal physics in Many-Body Quantum Systems – From Atoms to Quarks”, (2019/10, Villazzano, Italy) 招待講演

C02-10. M. Horikoshi, “The equation of state for Fermi gases in the unitary regime”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (SCES '19) (2019/9/27, Okayama, Japan) 招待講演

C02-11. M. Horikoshi, “Cold Atom Experiments for Cold High-Energy Physics”, HKUST IAS Focused workshop on “Quantum simulation of novel phenomena with ultracold atoms” (2019/5/7, Hong Kong) 招待講演

公募研究 C02 関連 -【雑誌論文】

C02-12. *Lai Hnin Phyu, H. Moriya, W. Horiuchi, K. Iida, K. Noda, and M. T. Yamashita, Coulomb screening correction to the Q value of the triple-alpha process in thermal plasmas, Prog. Theor. Exp. Phys. **2020**, 093D01 (2020). 査読有

C02-13. *S. Satsuka and W. Horiuchi, “Emergence of nuclear clustering in electric-dipole excitations of ${}^6\text{Li}$ ”, Phys. Rev. C **100**, 024334-1-12 (2019). 査読有

計画研究 D01-【雑誌論文】(H30-R4 年度: 査読付論文 144 報)

D01-1. *R. Lazauskas, E. Hiyama, and J. Carbonell, “Low Energy Structures in Reactions with $4n$ in the Final state”, Phys. Rev. Lett. **130**, 102501 (2023). 査読有.

D01-2. *Y. Lyu, T. Doi, et al., “Optimized two-baryon operators in lattice QCD”, Phys. Rev. D **105**(7) (2022). 査読有

D01-3. *E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto, “Possible Lightest Ξ hypernucleus with Modern ΞN interaction”, Phys. Rev. Lett. **124**, 092501 (2020). 査読有

D01-4. *Y. Yamaguchi, H. Garcia-Tecocoatzi, A. Giachino, A. Hosaka et al., “Pc pentaquarks with chiral tensor and quark dynamics, Phys. Rev. D **101**, 09152702(R) (2020). 査読有

D01-5. *S. Yamaoka and H.-D. Kim, “Decelerated Liquid Dynamics Induced by Component-Dependent Supercooling in Hydrogen and Deuterium Quantum Mixtures”, J. Phys. Chem. Lett. **11**, 4186 (2020). 査読有

D01-6. *K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, et al., “ $\Lambda\Lambda$ and $N\Xi$ interactions from Lattice QCD near the physical points”, Nucl. Phys. A **998**, 121737 (2020). 査読有

D01-7. *Q. Meng, E. Hiyama, K. U. Can, P. Gubler, M. Oka, A. Hosaka, H. Zong, “Compact $sscc^-$ pentaquark states predicted by a quark model”, Phys. Lett. B **798**, 135028 (2019). 査読有

D01-8. *Y. Kanada-En'yo, Y. Shikata, “Isoscalar dipole excitations in ${}^{16}\text{O}$ ”, Phys. Rev. C **100**, 014301(2019). 査読有

- D01-9. *Y. Kanada-En'yo, K. Ogata, "Microscopic calculation of inelastic proton scattering of ^{18}O , ^{10}Be , ^{12}Be , and ^{16}C for study of neutron excitation in neutron-rich nuclei", Phys. Rev. C **100**, 064616 (2019). 査読有
- D01-10. *T. Iritani, S Aoki, T. Doi, et al., "N Ω dibaryon from lattice QCD near the physical point", Phys. Lett. B **792**, 284 (2019). 査読有
- D01-11. *P. Naidon, L. Pricoupenko, "Width and shift of Fano-Feshbach resonances for van der Waals Interactions", Phys. Rev. A **100**, 042710 (2019). 査読有
- 【学会発表】 (H30-R4 年度: 94 件、内国際学会 61 件、招待講演 67 件)
- D01-12. P. Naidon, "QCD-like phase diagram of resonantly interacting SU(3) Fermi gases", Workshop "Universal physics in Many-Body Quantum Systems - From Atoms to Quarks" (2019/10/7-11, ECT*, Trento, Italy) 招待講演
- D01-13. T. Doi, "Recent progress on Lattice QCD of Two- and Three-Baryon Forces", Bethe Forum "Multihadron Dynamics in a Box" (2019/9/9-13, Bonn, Germany) 招待講演 A. Hosaka, "Threshold peaks in heavy hadrons Pc", Inha Hadron Mini Workshop, (2019/6/17-18, Inha University, Incheon, Korea) 招待講演
- 公募研究 D01 関連 -【雑誌論文】**
- D01-14. *E. Kido, M. Kimura et al., Evaluations of uncertainties in simulations of propagation of ultrahigh-energy cosmic-ray nuclei derived from microscopic nuclear models, Astroparticle Physics in print, 査読有
- D01-15. *T. Miura, Y. Akamatsu, *M. Asakawa, Y. Kaida, "Simulation of Lindblad equations for quarkonium in the quark-gluon plasma", Phys. Rev. D **106**, 074001(1-12) (2022). 査読有
- D01-16. *T. Otsuka, et al., " α -Clustering in atomic nuclei from first principles with statistical learning and the Hoyle state character", Nature Com. **13**, 2234 (2022). 査読有
- D01-17. Y. Kim, *M. Oka, K. Suzuki, "Doubly heavy tetraquarks in a chiral-diquark picture", Phys. Rev. D **105**, 074021-1-17 (2022). 査読有
- D01-18. *K. Uzawa, K. Hagino, K. Yoshida, "Microscopic description of cluster decays based on the generator coordinate method", Phys. Rev. C **105** (2022) 034326. 査読有
- D01-19. *Y. Chazono, K. Yoshida, K. Ogata, "Importance of deuteron breakup in the deuteron knockout reaction", Phys. Rev. C **106**, 064613 (2022). 査読有
- D01-20. *T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, et al., "Near-threshold behavior of positronium-antihydrogen scattering cross sections", Phys. Rev. A **105**, 052812 (2022). **Editor's suggestion** 査読有 公募山下-D01 班の共著
- D01-21. *K. Wen, T. Nakatsukasa, "Microscopic collective inertial masses for nuclear reaction in the presence of nucleonic effective mass" Phys. Rev. C **105** (2022) 034603. 査読有
- D01-22. *T. Kinugawa, T. Hyodo, Structure of exotic hadrons by a weak-binding relation with finite-range correction, Phys. Rev. C **106**, 015205 (2022). 査読有
- D01-23. *船木靖郎 「原子核中に起こるアルファ凝縮とクラスター構造形成の動力学」、日本物理学会誌「解説」 **77**, 602-610, 2022 年 9 月号. 査読有
- D01-24. Q. Meng, M. Harada, E. Hiyama, A. Hosaka, *M. Oka, "Doubly heavy tetraquark resonant states", Phys. Lett. B **824**, 136800-1-5 (2021). 査読有 公募岡-D01 班の共著
- D01-25. *K. Washiyama, N. Hinohara, T. Nakatsukasa, "Finite-amplitude method for collective inertia in spontaneous fission", Phys. Rev. C **103**, 014306 (2021). 査読有
- D01-26. *T. Naito, S. Endo, K. Hagino, Y. Tanimura, "On deformability of atoms-comparative study between atoms and atomic nuclei", J. Phys. B **54**, 165201 (2021). 査読有 公募遠藤、萩野の共著
- D01-27. *S. Ejiri, et al., (WHOT-QCD Collaboration), "End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy quark region by reweighting from quenched QCD", Phys. Rev. D **101**, 054505 (2020). 査読有
- D01-28. *Y. Kamiya, T. Hyodo, K. Morita, A. Ohnishi, W. Weise, K-p correlation function from high-energy nuclear collisions and chiral SU(3) dynamics, Phys. Rev. Lett. **124**, 132501 (2020). 査読有 公募大西、兵藤の共著
- D01-29. *K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, Y. Kamiya, *A. Ohnishi, "Probing $\Omega\Omega$ and $p\Omega$ dibaryons with femoscopic correlations in relativistic heavy-ion collisions", Phys. Rev. C **101**, 015201 (1-10) (2020). **Editors' Suggestion**, 査読有 公募大西、兵藤の共著
- D01-30. M. Harada, Y.-R. Liu, M. Oka, K. Suzuki, "Chiral effective theory of diquarks and U $_A$ (1) anomaly", Phys. Rev. D **101**, 054038 (2020). 査読有
- D01-31. *A. Io, T. Kawatsu, *M. Tachikawa, "Quantum Stabilization of the Frustrated Hydrogen Bonding Structure in the Hydrogen Fluoride Trimer", J. Phys. Chem. A, **123**, 7950-7955 (2019). Cover Image, 査読有
- D01-32. *T. Otsuka, et al., "Underlying Structure of Collective Bands and Self-Organization in Quantum Systems", Phys. Rev. Lett., **123**, 222502 (2019). **Editors' Suggestion** 査読有

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

図3に示すように、本領域研究の計画研究は、物質の階層それぞれで実験研究を進めるA01, A02, B01, B02, C01, C02各班、物質階層をつなぐ理論研究を行うD01班という構成である。すなわち、ハドロン分野の実験研究の**A01班**: クォーク階層とハドロン階層を繋ぐ動的機構(代表: 志垣賢太), **A02班**: クォーククラスターで読み解くクォーク・ハドロン階層機構(代表: 大西宏明), 原子核分野の実験研究の**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(代表: 田村裕和), **B02班**: エキゾチック核子多体系で紐解く物質の階層構造(代表: 中村隆司), 原子分子分野の実験研究の**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(代表: 高橋義朗), **C02班**: 物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理(代表: 堀越宗一)、そして階層をつなぐ理論研究をおこなう**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(代表: 肥山詠美子)である。計画研究は「クラスター」「力」「分離度」「閾値則」等のキーワードを介し、階層を越えた各実験班の間、あるいは実験班-理論班間で有機的に連携した。

公募研究は各階層の分野で独創的かつ計画研究と相補性を持ったテーマが参加した。それぞれの計画研究との結びつきとともに、「クラスター」「力」などのキーワードを介して、その他の班とも連携が進んだ。

総括班は、計画研究代表者7名全員と分担者の保坂淳(D01班), 近藤洋介(B02班)、関口仁子(B02班)、高橋俊行(B01班)から構成される。総括班会議を毎月行い、さらに「物質階層を横断する会」「国際レクチャーシリーズ」「検出器ワークショップ」「領域研究会」「国際シンポジウム」「インフォーマルミーティング」等を開催して、研究間の連携をプロモートしてきた。さらに、総括班が主導する戦略会議等によって新たな連携の芽を育ててきた。このように、本領域は強固な連携体制を築き上げ、それによって、セミ階層の新奇クラスター、クラスター間「力」の研究を進展させた。

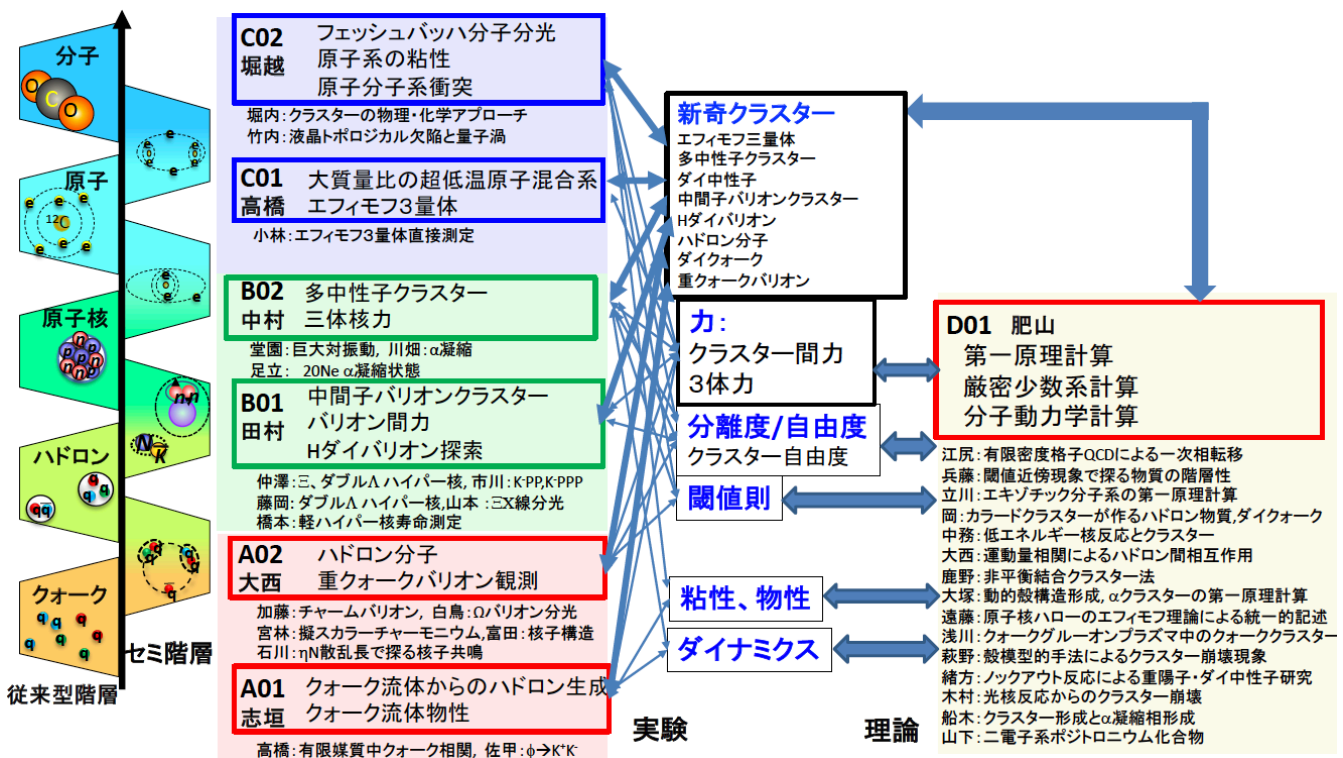


図3 本新学術領域における研究組織の連携体制。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等(本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など)の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究(総括班・国際活動支援班を含む。)がある場合は、その内容を記述すること。

研究領域全体での効果的使用の工夫

総括班では、主催した2回の検出器ワークショップなどを通じて、検出器に関する情報交換を行うとともに、共通化できる技術や機器の可能性を探ってきた。一方、A01, A02, B01, B02 班が関わる加速器実験については、加速器から供給されるビームが最近大強度化するとともに、扱う実験装置も精密化・大型化しており、これに伴い、収集するデータ量が飛躍的に増大しつつあった。こうした背景のもと、加速器実験におけるデータ収集システムに関する専門性を有する高エネルギー加速器研究機構・本多良太郎准教授(A02 班研究協力者、R3 より公募研究代表)を中心に、A02 班-B01 班の研究推進のため J-PARC において行う実験のためのデータ収集システムを合同で開発してきた[A02-4]。特に、A02 班が推進しているチャームバリオンスペクトロスコーピー実験で使用する電子回路(MPPC 読み出し用回路: CIRASAME、汎用読み出し回路: AMANEQ)はできるだけ汎用的なデザインを心がけ、研究班を超えた多くのユーザーが使えるようなものに仕上げた。

また、CERN ALICE 実験(A01 班)で読み出し用に使用している SAMPA チップを用いて高橋智則(公募)、新山(A02 分担)が開発を進めている小型連続読み出し回路が、A02 班, B01 班の J-PARC や SPring-8, B02 班の RIBF や RCNP の測定機器において、活用が進むことが今後見込まれている。

研究費の使用状況:

総括班 全期間にわたって事務支援員を1名雇用し、事務業務(経費管理、旅費の処理など)を効率化した。そのほか、領域研究会等の国内研究会の国内旅費の支援では特に若手の旅費支援に重点を置いた。国際レクチャーシリーズや国際シンポジウム(国内開催)については海外からの招聘研究員の旅費支援、および講演謝金を支出した。また、国際活動支援の一環として、外国旅費の補助も行った。

計画研究

A01 全期間を通じ、ALICE 実験主飛跡検出器高度化のための大型電子検出器、前方検出器系における新規前方ミュオン粒子飛跡検出器制御系、データ収集系の革新的高速化、計算グリッド拠点整備など、同実験高度化の基幹部分に対する開発建設費、および実験現場である CERN 研究所への滞在旅費を中心に執行した。これらを推進するため、H30-R1 年度に前方ミュオン粒子飛跡検出器制御系を所掌する特任助教1名、R3-5 年度に計算科学を専門とする研究員1名を雇用した。

A02 (1) SPring-8/LEPS2 実験用の中心的な飛跡検出器・タイムプロジェクションチェンバー(TPC)の読み出し回路の整備を行なった。また、K 中間子原子核である K-pp 光生成実験に必要な粒子識別検出器であるエアロゲルチェレンコフカウンターを本研究費にて製作した。また、 Λ (1405) 光生成実験に不可欠な、LEPS2 ビームライン光子エネルギーの高エネルギー化のための深紫外レーザーの整備を行なった。これらはすべて LEPS2 実験装置にインストールされ、順調にデータ収集に貢献している。(2) J-PARC ハドロン分光実験のために、シンチレーションファイバー検出器、バレルドリフトチェンバー(BDC)と標的の下流ドリフトチェンバー(KLDC)の整備、MPPC 読み出し用回路: CIRASAME と汎用読み出し回路: AMANEQ の製作、トリガーレス連続読み出し DAQ システムの構築を実施した。全てのコンポーネントを J-PARC に建設したテストベンチに持ち込み、最終的なシステム試験の準備が完了した。

B01 J-PARC E40(高精度の Σp 散乱実験)、E42(H ダイバリオンの探索実験)、E03(Ξ 原子 X 線分光実験)の準備と実施、E70(Ξ ハイパー核分光実験)、E63(軽い Λ ハイパー核の γ 線分光により ΛN 相互作用と核内 Λ の構造を調べる実験)の準備のために使用した。また、E07 実験のエマルジョン解析のためポスドクを雇用した。

B02 i) 多中性子クラスターの研究: 多中性子クラスター生成実験のための反跳陽子検出器(シリコン飛跡検出器 PFAD、および CsI(Na) 検出器 CATANA)の整備に本研究費を使用した。また、検出器の開発や、多中性子クラスター研究の遂行のため、特任助教2名(H30-R2, R3)、特任准教授1名(R4)を雇用した。ii) 少数核子系プローブによる三体核力の研究: 三陽子間に働く三体核力を解明する事を目的として、陽子と ^3He の散乱実験を遂行するため、高偏極・高密度の偏極 ^3He 標的を整備した。同標的を用い、

東北大 CYRIC(H30, R1, R2, R3)、阪大 RCNP(H30)においてスピン観測の測定を遂行した。(ii-b) (p, pN)反応のスピン観測の完全測定による核力の精密化: (p, pN)反応のスピン観測の完全測定のための陽子検出器・偏極度計(2nd-FPP)および高速データ収集システム(Babirl)を整備した。また、検出器開発および加速器実験(R2, R3に東北大CYRIC、R4に大阪大学RCNPにて)を遂行した。

C01 全期間を通じて、物品費を重点的に執行した。本C01班での購入物品は、実験の性格上、共用することはできない。

H30:特に、高精度波長計を導入し、レーザーの波長計測及び安定化を実現すると同時に、Er原子のレーザー冷却光源としてDLC-TAPRO(801.82nm)を導入し、大量のEr原子のレーザー冷却を実現して、実験に活用した。

R1:特に、レーザー冷却光源としてDLC-TAPRO(1111.3nm)を導入し、大量のYb原子のレーザー冷却を実現して、実験に活用した。

R2:特に、Dual Filament型Er原子オープンを導入し、高輝度Er原子ビーム生成に寄与している。

R3:オフセットサーボコントローラー、GPS時間および周波数システム、周波数カウンタ、外部共振器付LDモジュール、等を導入し複数レーザーの短期及び長期の周波数安定化を実現した。

R4:特に、オプティカルラック3段タイプを導入し、コンパクトな配置でのレーザー冷却実験を可能とした。波長変換ビート検出装置を導入し、励起光源の周波数安定化を実現した。また、人件費として、博士研究員の砂賀氏の雇用を使用し理論計算研究に寄与している。

C02 本研究費を用いて大阪公立大学で冷却⁶Li原子実験の装置開発が完了し、量子シミュレーターとして本格稼働している。特に機械学習を導入した制御システムは量子シミュレーターの性能を向上させた。その他、レーザー光源システム、光トラップシステム、観測システムの開発に研究費を使用した。実験と理論を比較するため、大規模数値用ワークステーションを慶應義塾大学に導入し、量子クラスターの理論研究で成果を示した。また、若手研究者の育成のため高知大学にポスドクを2人雇用し、その後研究機関でポストを得ている。

D01 主に、毎年、2名のポスドクの雇用に予算を使用した。1名は、本新学術領域期間中の長期の雇用、他のポスドクは、任期2年で、新学術領域研究期間中に3名の雇用を実施した。その他、国際レクチャーシリーズの謝金、および講師の旅費に予算を使用した。

最終年度の繰越:

総括班 新型コロナウイルスの感染拡大による影響で、招聘予定であった海外研究者の海外出張の制限により招聘できなくなり、招聘をR5年度に延期するため繰越した。

計画研究

A01 当初R3年度に予定したALICE実験第三期運転開始がコロナ禍の影響でR4年度に延期され、本研究で進めてきた検出器高度化の威力を発揮する物理データ収集を予定したが、ロシア問題などによるエネルギー価格高騰によりLHC加速器の運転時間が短縮され、特にR4年秋に予定した原子核相互衝突運転がR5年秋へ延期された。これに伴い、原子核相互衝突データ収集と物理解析の関連予算をR5年度に繰越した。

B01 J-PARCのビームタイム遅延のため、E70実験(Ξハイパー核分光実験)がR5年度に実施されることとなり、実験実施にかかわる予算やそのビームタイム中に行う予定だったE63(軽いΛハイパー核のγ線測定)実験用の検出器テストにかかわる予算を繰り越した。

B02 当初R3年度に予定していた反跳陽子検出器のCsI(Na)結晶購入について、結晶が不足し入手が困難になったことから、購入可能なものに変更する必要が生じ、R5年度に繰越をすることとした。

D01 最終年度に、中性子過剰原子核、ハドロン物理に関して、新しい物理結果が得られ、そのまとめを繰り越しして実施することとした。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の格段の発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本研究領域は①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すものである。下記の表には本領域研究のハイライト的成果を抜粋し、そのインパクトをまとめた。各物質階層が、異なる階層の視点で研究され、従来見えなかった力、クラスター形成、階層の特徴が明らかになり研究が大きく進展した。よって当初に想定した以上の達成度が得られたと考えている。発見した様々な新奇クラスターについては、精密測定や第一原理計算が今後予定され、セミ階層学の更なる進展が期待される。

ハイライト成果	概要	当該分野へのインパクト	階層をつなぐ成果とインパクト	関連分野へのインパクト	
ストレンジネスを含むバリオン間力の精密測定と第一原理的理解 (B01,D01)[B01-2,3,5]	$\Sigma^{\pm}p$ 散乱断面積を高精度測定、QCD計算の検証と核力の斥力芯の起源の解明が進んだ	原子核：一般的なバリオン間力の理解につながる画期的成果、核力の斥力芯の起源解明も	原子核層形成の元となるバリオン間力をクォーク階層から理解	ハドロン物質の状態方程式の決定により未知の中性子星内部物質の解明へ	
原子核層と原子層における三体力の測定 (B02,C01)[B02-5,7]	$p^3\text{He}$ 散乱精密測定；光格子中少数原子系による三体力量子シミュレーション	原子核：荷電スピン3/2 三体力を初測定；原子：3 体力の冷却原子シミュレータ成功	クォークレベルで核力の理解、冷却原子による原子核の三体力研究枠組みを整えた	中性子物質の状態方程式、中性子星の構造の解明へ。少数量子系を理解する鍵ともなる	
格子 QCD 計算と少数計算の融合による新奇クラスターの予言 (D01)[D01-3,6,10]	格子 QCD 計算でストレンジネスをもつバリオン間力を導出、NNNE ハイパー核を予言	格子 QCD 計算と厳密少数計算によりハイパー核の第一原理かつ定量的予言が可能に	クォークレベルから上部セミ階層のクラスター間力、新奇クラスターの予言が可能に	状態方程式、中性子星を解く鍵、厳密少数系計算の化学分野への応用	
階層変化を可視化する量子シミュレータ完成 (C02)	量子多体理論と冷却原子を用いた量子シミュレーション実験	原子：粒子間相互作用と粒子数密度で階層変化を普遍的に整理した	多体効果による新奇なクラスター状態と多体力の存在を理解した	殻構造をもつクラスター生成の量子シミュレーションの可能性	
新奇クラスタの発見	中間子原子核初観測 (A02,B01,D01)[A02-3,7]	中間子原子核 K^-pp を初観測。 K^-ppn の観測にも成功	原子核ハドロン：中間子-バリオン力の研究等、ハドロン物理の新展開	QCD による第一原理的理解。セミ階層の分離度・閾値則理解	中性子星や初期宇宙で中間子原子核の存在の可能性などを探究
	ハドロン分子の証拠 (A02,B01,D01)[A02-1]	$\Lambda(1405)$ が K^-p ハドロン分子状態である実験的証拠を得た	原子核ハドロン：長年謎であった $\Lambda(1405)$ の構造を実験的に解明	QCD による第一原理的理解。セミ階層の分離度・閾値則の解明	ハドロン分子の、初期宇宙や中性子星における存在を探究
	多中性子クラスターの観測 (B02,D01)[B02-1,4,6,8]	ダイ中性子クラスター観測、テトラ ^{28}O の初観測	原子核：中性子クラスターの解明、中性子間力、N 中性子相関を解明	他階層のクラスターとのアナロジーの解明。閾値則の解明	中性子物質の状態方程式、中性子星の解明。元素合成過程解明
	新エフィモフ三量体 (C01)[C01-1]	巨大質量比のフェルミ原子 Er-Er-Li のエフィモフ 3 量体を示唆するデータを初めて取得	巨大質量比の系で可能となる、角運動量をもつ新奇エフィモフ 3 量体の発見に繋がる	不安定核におけるボロミアン系、重クォークを含むバリオンとのアナロジー研究への進展	原子・分子・原子核などの少数量子系の普遍的性質を理解する鍵

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和5年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

若手育成を最重要課題の一つと位置付け、総括班が主導し、下記のような取り組みを行ってきた。

スクール 学生、若手研究者を主な対象とする領域全体のスクールを2018-22年度まで**年1回ずつ計4回**開催した。また、若手の発表機会も設け、若手の研究をプロモートした。

国際レクチャーシリーズ 海外の著名研究者を招聘する国際レクチャーシリーズを行い、本領域研究で鍵となるトピックスを若手がじっくり深く学ぶ機会を提供した。計**12回**開催。R1年度より若手のミニワークショップをなるべく合わせて行い、若手の講演機会を設け、招聘研究者との研究交流を促進した。

国際シンポジウム 国際シンポジウムをR1年度(CLUSHIQ2020, 別府市), R4年度(CLUSHIQ2022, 仙台市)の計2回主催した。CLUSHIQ2020, CLUSHIQ2022とも若手に積極的にポスター発表してもらい、優秀ポスター賞を表彰した(CLUSHIQ2022ではANPhA賞)。同時期、招聘研究者によるセミナーが各大学で行われた。

国際スクール 毎年行われるストレレンジネス核国際スクール(SNPスクール)をR1年度より本領域が共催しており、講師を計画研究から派遣し、また学生や若手の積極的な参加を促した。

その他のスクール 各計画研究が主催して、若手・学生が各階層の物理を学ぶ機会を設けた。アトムの会(冷却原子, C02), チュートリアル研究会(エネルギー重イオン衝突の物理, A01)などが開催された。

検出器ワークショップ 若手に積極的に参加し発表してもらい、最先端の検出技術に触れる機会を作るとともに分野間の交流を促進した。計2回開催した。

若手の受賞、学術分野への就職、昇進 受賞、学術分野への就職、昇進の実績等を下記にまとめる。

受賞実績 : 34名(のべ人数)

物理学会学生優秀発表賞: 枝川知温(公募/緒方, 阪大, R4), 鶴沢浩太郎(公募/萩野, 京大, R4), 神谷直紀(公募/山下, 東北大, R4), 木村祐太(A02, 阪大, R2), 北山翔(B02, 東北大, R1), 小野滉貴(C01, 京大, R1), 井上南(B02, 東北大, H30), 日本物理学会若手奨励賞/原子核談話会新人賞: 足立智(公募/川畑, 東北大助教, R4)

日本物理学会若手奨励賞: 山口康宏(D01, JAEA 博士研究員, R3)

37th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics Best Poster Prize: 神谷直紀(公募/山下, 東北大)

ANPhA/AAPPS-DNP Award: Kai Wen(公募/中務, KEK 研究協力員, H31)

東北大学総長賞: 渡邊跡武(B02, 東北大, R1); 同物理学専攻長賞(修士論文): 井上南(B02, 東北大, R2)

青葉理学振興会・黒田チカ賞(東北大): 藤田真奈美(B01, 東北大, R1)

阪大 QLEAR 事業 2022年度研究者交流会中間発表会・ポスター優秀発表賞: 中田響(公募/緒方, 阪大, R4)

Springer Thesis Award: 藤井大輔(阪大, R4)

優秀ポスター賞(CLUSHIQ2020): 延興紫世(B02, 京大), Yonghree Kim(D01, 九大)

優秀ポスター賞/ANPhA賞(CLUSHIQ2022): 1st: 齋藤由子(B02, 東北大), 2nd: 松本萌未(D01, 東北大) 3rd: 春名裕貴(C01, 京大), 同敢闘賞: 衣川友那(D01, 都立大)

橋本賞/ANPhA賞 1st: 末永大輝(D01, 阪大, R3), Z. Omar(A02, 阪大, R1), 2nd: 大浦文也(B01, 東北大, R3), 3rd: Z. Omar(A02, 阪大, H30), Incentive賞: 大浦文也(B01, 東北大, R4), 齋藤由子(B02, 東北大, R3), 坂尾珠和(B01, 東北大, R3)

修士論文賞(ハドロンホールユーザー会): 坂尾珠和(B01, 東北大, R2), 中須賀さとみ(A02, 京大, R2), 赤石貴也(A02, 阪大, H30), 藤岡徳菜(B01, 東北大, H30), 松田薫平(B01, 東北大, H30)

学術分野への就職: 4名: 藤田真奈美(東北大 D3)→特任助教(東北大); 七村拓野(京大 D3)→JAEA 博士研究員; 渡邊跡武(東北大 D3)→助教(東工大); 藤井大介(阪大 D3)→JAEA 博士研究員

昇進実績: 15名: 山口頼人(広島大特任助教)→准教授(広島大); 富田夏希(阪大 RCNP 特任研究員)→京大理学研究科特定助教; Kim Shinhyung(高麗大博士)→原子力研究機構博士研究員; 足立聡(ポスドク)→東北大 CYRIC 助教; 古野達也(阪大教務補佐員)→阪大助教; 鈴木溪(JAEA 博士研究員)→同研究員; Guang Juan Wang(JSPS 外国人特別研究員)→KEK 理論センター助教; 末松大輝(阪大 RCNP 研究員)→理研基礎科学特別研究員; 本多良太郎(東北大助教)→KEK 准教授; Wang He(特任助教)→理研研究員; 山本剛史(JAEA 卓越研究員)→JAEA 研究員; 藤田真奈美(東北大特任助教)→JAEA 卓越研究員→JAEA 研究員; 土居孝寛(阪大 RCNP)→京大助教; 山口康宏(JAEA 博士研究員)→名大助教; 吉田純也(東北大任期付助教)→東北大准教授

統計: 若手/全数: 代表者分担者: 9/69, ポスドク: 6/6, 特任助教: 12/13, 協力研究者: 101/210

学位取得者数: 博士: 44名 修士: 147名

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

総括班評価者は、初田哲男氏（理化学研究所数理創造プログラム・ディレクター）、櫻井博儀氏（理化学研究所仁科加速器科学研究センター・センター長）、平野琢也氏（学習院大学理学部物理学科・教授）の三名の方をお願いした。

初田氏は、クォーク・ハドロン物理理論の第一人者であり、格子 QCD(量子色力学)の世界的権威である。冷却原子の物理の研究もされており、まさに物質階層を超える物理を理論研究で実践されている。櫻井氏は、原子核物理学の実験的研究、特に不安定核物理の世界的第一人者であると共に、核物理の産業応用やクォーク・ハドロン物理にも詳しい。平野琢也氏は量子光学の第一人者で冷却原子の物理、特にスピノールボース・アインシュタイン凝縮体の物理に詳しい。この三名の評価者の専門分野は本領域の広い分野をカバーしている。また、本評価者の方々は、物質階層の繋がりを意識した広い見識を持っておられる研究者で、若手の育成にも力を注がれており、本領域の総括班評価者としてふさわしい。

この3人は、本領域発足当初から総括班評価者をされており、総括班会議、領域研究会、国際シンポジウムへの参加などを通じて助言をいただいていた。また、中間評価においても、総括班評価者として評価をいただいた。

本領域に対する評価コメント

初田哲男氏

本領域は、クォークから分子に至る各階層に発現するクラスター構造と、各階層の中間（セミ階層）に現れる新奇なクラスター構造について、クラスター間に働く力の解明、新奇クラスターに共通する現象と論理の解明を目標に、異なる分野の研究者が密接な情報共有を行いながら研究を進める国際的にもユニークな研究領域である。分野を越えた情報共有を活性化するために、「物質階層を横断する会」「国際レクチャーシリーズ」「検出器ワークショップ」を柱として、領域全体でのスクール、研究会、国際シンポジウムが多数開催され、その中で広い視野をもった若手研究者育成が進んだことは高く評価できる。また、2019年から7つの戦略課題を設定し、「分野横断インフォーマルミーティング」および「クラスター勉強会」を通じて積極的に計画班間の議論を活性化することにより、クォーク対相関-中性子対相関-原子対相関の類似性と異質性に関する理解が進展したこと、異なる強相関物質の粘性率に関する共通の理論的基盤構築の可能性が拓けたこと、冷却原子を用いたクォーク物質や中性子物質の量子シミュレーションの可能性が拓けたことなどは高く評価できる。本研究領域で端緒が捉えられた量子クラスター発現の論理については、7つの戦略課題を中心に今後も引き続き議論を行い、分野連携研究の成果を創出していくことが望まれる。Eur. J. Phys. AのTopical Article Collectionに出版予定の総合報告では、各階層での成果報告に加えて、本研究領域で見えてきた、階層を越えたクラスター概念の普遍性に関する展望の記述をぜひ含めて頂きたい。

櫻井博儀氏

本領域は、クォークから分子までの物質の階層をつなぐキーワードとして、階層間のセミ階層に現れる「クラスター」に注目し、クラスターの観測とその理論的な考察を進めることで、各階層で支配的な相互作用の違いを超えた量子多体系の普遍的な秩序を見出すことに挑戦した。

上記の本領域の目的に沿った研究成果が「10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況」にまとめられており、その量と質は圧巻である。短期間で階層間をつなぐ多くの研究成果を生みだし、また、これらの成果は複数の計画班の共同研究で得られていることも注目すべき点である。これは、総括班が目標設定と立体的な研究会を開催することで、有機的に本領域の研究を進めたことを示しており、コロナ禍の困難な状況にあっても、総括班の研究マネジメントが円滑にかつ、効率的に実施されたことを

物語っている。また、本領域では、状態方程式、中性子星内部構造にインパクトを与える成果が挙がっており、本領域は、宇宙・天体分野への波及効果も生み出したと言える。

特筆すべき成果として、原子核層と原子層における三体力の測定、多中性子クラスターの観測を挙げたい。クォーク・グルーオンの複合粒子系である核子が励起状態をもつことが三体力の本質であり、その概念が原子系にも応用されている。またテトラ中性子や酸素-28の観測により、核子N体力 ($N>3$) の議論にも広がった。

各階層での研究成果も十分であり、若手の受賞、就職、昇進実績からも、若手が研究成果を挙げ、人材育成にも多大な貢献をしたことが伺える。これも本領域の特筆すべき成果である。

階層性をつなぐ統一的な新たな概念の創出は、本領域で構築された研究ネットワークを基盤にして、今後も挑戦が継続することが期待できる。

平野琢也氏

本研究領域は、微視的物質における階層構造の起源の解明という自然科学の基礎的な問いに対して、複数の分野の研究者が有機的な連携の下に研究を行ったもので、階層間の境界に現れる現象を対象とする新興・融合領域の創生に繋がる多くの成果が上がっている。クォーク・ハドロン・原子核・原子・分子という階層構造の境界に現れるクラスター構造に焦点を当て、ハドロン物理学・原子核物理学・原子物理学等の複数の分野にまたがる研究者が研究領域全体としての成果を上げるために、「物質階層を横断する会」を計11回、「国際レクチャーシリーズ」を計12回、「検出器ワークショップ」を2回開催する等の活動を活発に実施した。また、複数の計画研究を束ねる7つの戦略課題 (A01・C01・C02・D01班が取り組む粘性、完全流体挙動、B01・B02・C01・C02・D01班が取り組む3体力、全ての班が取り組むダイクォーク・ダイ中間子・強相関フェルミ原子対等) を設定し、各計画研究間の連携を深めるための活動を実施した。これらは、領域代表の中村教授の卓越したリーダーシップの下で行われた活動であり高く評価される。これらの活動の成果として、領域研究会では、階層間、実験-理論間で問題意識を共有した議論が活発に行われており、階層間に現れるクラスター現象に係る独創性・新規性を有する新興・融合領域の創生が進んだことを示している。具体的な研究成果として、例えば、戦略課題の粘性については、冷却フェルミ原子気体のBCS-BECクロスオーバー領域における粘性率を質量アンバランスがある場合に理論的に評価し、クォークグルーオンプラズマ(QGP)への適用が議論された。また、3体力については、原子核層と原子層における3体力の測定等、異なる階層を有機的に結びつける多くの成果があがっている。これらは、多様な研究者の有機的な連携によって成し遂げられたもので、新学術領域研究として、優れた成果と言える。冷却原子系を用いた量子シミュレータの実現については、質量が異なる超低温混合気体の生成、質量だけでなく磁性も異なるボース凝縮混合系の生成、エフィモフ3体状態を示唆する結果、摂動領域から非摂動領域にわたる広範な相互作用領域での3体力のエネルギーの実験的な決定、ユニタリー極限における状態方程式の実験的な評価等の優れた成果が得られており、当初の想定以上の達成度といえる。以上のほかにも、各計画研究、公募研究で多数の成果が得られており、査読のある国際誌に毎年度200報程度の論文として発表する等研究領域全体で優れた研究成果をあげている。さらに、戦略課題で得られた成果を中心に、国際誌での特集号を出版する準備が進んでおり、本研究領域の推進により創生された新興・融合領域の国際的な認知度の向上が期待される。若手研究者の育成についても、のべ34名の若手の受賞、15名の昇進実績、44名の博士の学位取得等優れた貢献があった。また、計画研究の代表者が研究期間中に紫綬褒章を受賞する等、本研究領域への学界からの高い評価は、学問分野への貢献度の高さを示すものといえる。