

領域略称名：クラスター階層  
領域番号：6005

令和2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）」  
に係る中間評価報告書

「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2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	研究領域の目的及び概要	5
4	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	7
5	研究の進展状況及び主な成果	9
6	研究発表の状況	14
7	研究組織の連携体制	19
8	若手研究者の育成に関する取組状況	20
9	研究費の使用状況・計画	21
10	今後の研究領域の推進方策	22
11	総括班評価者による評価	24

**研究組織**

(令和2年6月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、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	3
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	九州大学・理学研究院・ 教授	6
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 7 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、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]
A02 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
A02 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
A02 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
A02 公	19H05141 光子ビームを使った $\eta$ 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
B01 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
B02 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
B02 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
C01 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
C02 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 涉	北海道大学・理学研究院・講師	1
C02 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	竹内 一将	東京大学, 大学院理学系研究科(理学部), 准教授	1
D01 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
D01 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

D01 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
D01 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
D01 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
D01 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
D01 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
D01 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
<b>公募研究 計 18 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、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 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。

微視的な量子の世界に、クォーク・ハドロン・原子核・原子・分子という階層構造が何故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これまであまり議論されてこなかった。本領域は、我が国が世界をリードする各階層の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。そのため、異なる階層間の境界に現れる新奇のクラスター現象に焦点を当てて研究を進め、スケールが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、普遍性からのずれの理解から各物質階層の研究を深化させる。こう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指している。

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。階層構造の理解には各階層の構成粒子(クラスター)と、これを支配する「力」の分析が必須である。

本領域では、従来型階層の「境界・中間」に属する「セミ階層(サブ階層)」(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ている。セミ階層は、ダイクォーク、中間子、ダイ中性子、 $\alpha$ 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。最近、こうした新奇クラスターの発見が相次ぎ、関連する実験・理論研究が急速に進んでいる。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、クラスターと共に、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」と考えることができる。本領域では、階層構造を解く指標として「力」「自由度」「閾値則」「分離度」を掲げ、その本質的理解を目指す。

図2には、本領域の組織、研究の進め方、目標を模式的に示した。本領域では各物質階層の分野で世界を牽引している研究グループを7つの計画研究班に組織した。すなわち、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と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)、J-PARCにお

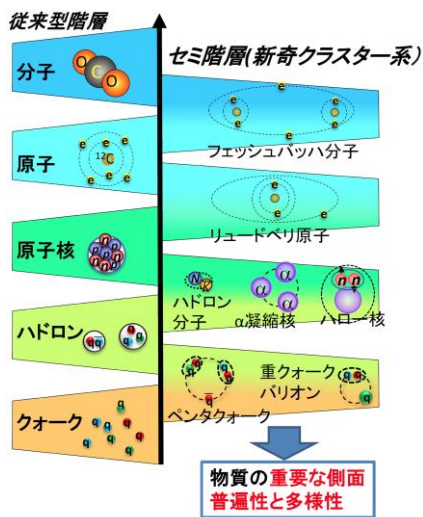


図1. 物質の階層とセミ階層の概念図

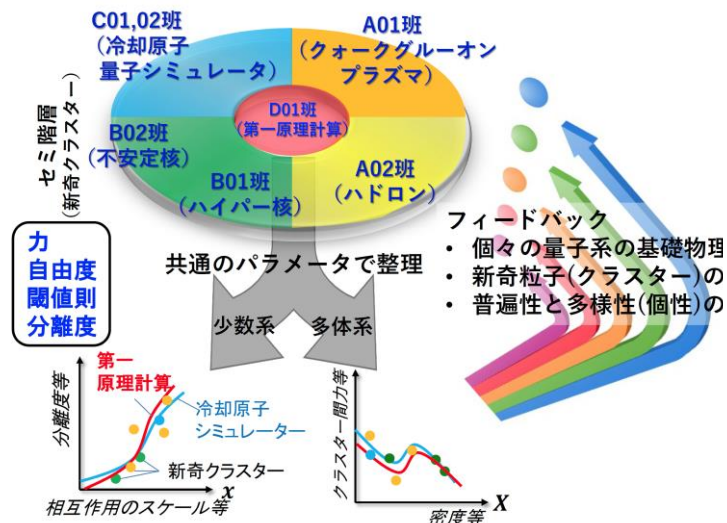


図2. 本領域の組織、研究の流れ・目標の概念図

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理研 RIBF 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 における三体核力の実験(B02 班)、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)、及び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が行われ、それらを特徴付ける相互作用、分離度、密度などが抽出され、図2左下のように点としてプロットされる。これを冷却原子の量子シミュレーション(C 班)や第一原理計算(D01 班)で描かれる普遍的曲線と比較することで、クラスターの普遍性が見つかり、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。本領域研究終了時までには、こうした例がいくつか見つかり、階層を特徴付ける指標や普遍性の理解が進み、個々の粒子・クラスターの基本法則や物理が解明されていくと期待される。さらに、未知の課題「中性子星核物質の状態方程式」や「QCD 相図」の解明への応用も期待される。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される。

各計画研究では、以下のように研究、連携研究を進める。

A01 班：高エネルギー原子核衝突実験を CERN ALICE で行い、クォーク層からハドロン層への動的過程を調べる。ダイクォークや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を他班との連携研究によって明らかにする。

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」を探索する。またハドロン分子、重クォークバリオンにみられるエキゾチックハドロンの精密測定を行い、その中の新奇クラスターを探り、階層を貫く普遍性を探る。

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の白色の「力」が生ずるメカニズムを解明する。ハドロン-原子核間のセミ階層となる中間子原子核 ( $K_{pp}$  等) の性質や分離度を調べる。また、核内でのバリオンの性質変化から原子核層がなぜハドロン層からよく分離しているのかを調べる。これらを解明するため、世界初の高統計  $\Sigma p$  散乱実験を実現し、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(クラスター)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。ダイ中性子については、ハドロン系のダイクォークや、冷却原子系に現れる強相関フェルミ原子対との類似性に着目した連携研究を進める。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：異種原子間の相互作用を磁場により任意かつ精密に実時間制御するフェッシュバッハ共鳴法を確立する。特に、冷却原子系として極めて大きな質量比を有する Er、Yb、および Li からなる超低温原子混合系を生成し、角運動量を持ったエフィモフ 3 量体などその特異な性質を実験的に解明することにより、クラスターや階層の物理の理解を深化させる。異なる質量比の粒子・クラスターで構成されるハドロンや原子核系の量子シミュレータとなることも期待される。

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。冷却原子系は量子系を段階的に調整できる特長を持つ。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。さらに異なる階層の粒子系の実験と比較し、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、各階層の第一線で活躍する理論研究者を結集し、「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の理論研究を展開し、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。

本領域は、以上のように、より基本的階層から上部階層の第一原理的理解、および、制御可能な階層から下部階層におけるクラスター現象の解説を進める。各階層の研究を有機的に連携させ、階層を繋ぐ普遍的現象や法則の発見とその解明を進め、物質科学の新たな融合領域の創成を目指す。



#### 4 審査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は「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3に示すようなさまざまな活動を通じて、各計画研究間の交流を深め、共同研究をプロモートしている。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」がその柱となっている。

「物質階層を横断する会」は副題を「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、物質階層の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ている。これまで行われたテーマは表1の通りで、2年間で5回行われた。ハドロン・原子核層のクラスター間の「力」を深堀するもののほか、第3回の「冷却原子分野、ハドロン分野における共鳴の研究」のように広い階層にわたって問題となっている「共鳴現象」を議論する会も行った。

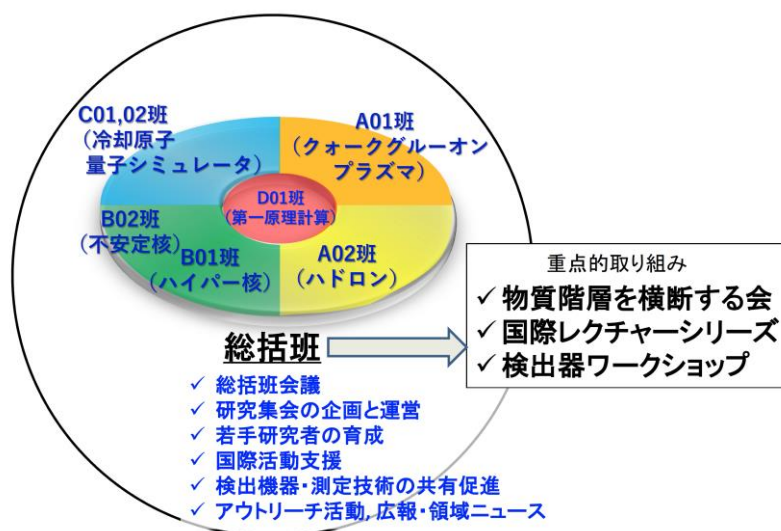


図3. 階層をつなぐ本領域の取り組み

今年度も「粘性と完全流体」などのテーマについて階層を横断する会を企画している。

	場所、日程	テーマ
第1回	京大基研, 2018.10.15	$\Xi N$ 相互作用とその実験データ
第2回	理研, 2018.12.4	$\Sigma p$ 散乱実験の現状および $\Sigma N$ 相互作用に関連した話題
第3回	理研, 2019.2.12	冷却原子分野・ハドロン分野における共鳴の研究
第4回	理研, 2019.5.10	$\Xi$ ハイペロン吸収によるダブル $\Lambda$ ハイパー核フラグメント生成
第5回	理研, 2019.8.8	軽いグザイハイパー核の構造と生成

表1. 物質階層を横断する会（ハドロン・原子核・原子・分子合同ミーティング）のテーマ一覧

「国際レクチャーシリーズ」は、世界的に活躍する著名な研究者を講師として招聘し、次ページ表2のようにすでに6回行っている。講師には、物質の階層を横断することを意識し、3コマ程度の講義をしてもらっている。これまで、「相互作用、力」「少数粒子系」などの階層を超えた物質の本質、普遍性に焦点を当てたテーマを設定した。さらに、R1年度にはレクチャーの他、ミニワークショップを半日程度設けて、本領域研究の若手の研究者と海外からの招聘研究者との交流をプロモートした。

「検出器ワークショップ」の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。（「量子ビーム応用」代表高橋忠幸氏）」にこちらから声をかけ、合同ワークショップとしてR1年9月20,21日に行った(参加者58名)。「量子ビーム応用」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に掲げている領域研究であり、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の開催を計画している。さらに、総括班では、B01班代表の田村裕和（東北大）を中心に検出器や測定技術の共用化を検討している。さらに、R2年9月か



らは、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る。

	場所、日程	講師	テーマ
第 1 回	九大, 2018.11.28-30	J.Carbonel	The Few-Nucleon System : from Yukawa to LQCD
第 2 回	理研, 2019.1.8	P. Naidon	Universal clusters and Efimov physics
第 3 回	京大, 2019.2.19-20	T.Momose	極低温分子・クラスターの分光とダイナミクス
第 4 回	京大, 2019.3.22-23	E.Epelbaum	Chiral EFT for low-energy nuclear physics: foundations, applications and perspectives
第 5 回	京大, 2019.10.28-30	D.Lee	Nuclear Lattice simulation
第 6 回	九大, 2020.1.15-16	T. Rijken	Baryon-baryon interactions generalized Yukawa forces

表 2. 国際レクチャーシリーズの一覧

以上に加え、これまで領域全体でスクールを 2 回、研究会（領域研究会）を 4 回行った。そのうち第 2 回、第 3 回領域研究会では公募研究との連携を重視したプログラムとした。さらに、R2 年 1 月 23, 24 日には国際シンポジウム“International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020)”を開催し、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が交わした（参加者 75 名、うち海外からの参加者 9 名）。

ここで、これまでの計画研究間で進んだ連携研究を簡単にまとめる。B01 班は、D01 班の理論計算を活用し、実験の提案、実験精度や得られる成果の予想、実験データの解釈を行っている。これまでに、軽い  $\Xi$  ハイパー核のエネルギースペクトルや核内  $\Lambda$  磁気モーメントの計算で連携した。さらに、研究の方向性を議論し、新たな実験提案につなげるために、 $\Xi$  ハイパー核、ハイペロン・核子散乱、核内  $\Lambda$  の相互作用などのテーマで「物質階層を横断する会」を活用した。C01 班は D01 班と協力して、巨大質量比をもつエフィモフ 3 量体の実験計画を練り、また、アルファ核（原子核）とプラケット光格子（冷却原子）の間に見られる SU(4)シングレットとしての類似性を探るため D01 班と議論を重ねている。C02 班は、A01、C01、D01 班と協力し、冷却原子・ハドロン分野における「共鳴」やその他の現象について「物質階層を横断する会」や C02 班代表が主催する合同セミナーを通じて議論を行ってきた。その結果、C02 班の体積粘性率の測定や、せん断粘性率の理論計算を進展させることができ、A01 班が進めている重イオン衝突実験における完全流体的膨張現象との普遍性を探る連携が可能になりつつある。また C02 班が精密測定したフェッシュバッハ分子の双極子励起実験は、B02 班が行っている中性子ハロー核の双極子励起実験との類似性の可能性があり、今後議論を進めていく。さらに C02 班のフェッシュバッハ分子の分光データを、D01 班が原子核やハドロン系に対して開発した精密少数系計算の手法で解析することにより、原子核理論と量子化学の新たな連携が生まれる期待がある。

本領域研究の後半での連携強化に向けて、R1 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」を開催した。ここでは、より戦略的に連携研究を設定し、本領域の目標達成を目指すこととした。ここで、今後連携研究を強化していくテーマとして

- ◇ 粘性、完全流体挙動（計画研究 A01,C01,C02,D01）
- ◇ 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）
- ◇ 3 体力（B01,B02,C01,C02,D01）
- ◇ 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）
- ◇ 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）
- ◇  $\alpha$  クラスタと冷却原子の SU(4)系（B02,C01,D01）
- ◇ 核力の媒質効果（B01,B02,D01）

を設定した。これらは、「物質階層を横断する会」「レクチャーシリーズ」などで深堀した後、具体的な連携研究、共同研究に繋げていくこととしている。今後も総括班が主導して連携研究を強化していく。こうして、クォークから分子に至る、スケールの異なる物質の階層をつなぐ新しい研究領域の創成を成し遂げる。

## 5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか、(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) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

**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頭わにし、階層を跨ぐ量子多体系の普遍的理解に挑む。研究期間内の目標達成に向け、R2年度までを準備段階と位置付け、本研究の実施に必要なALICE実験高度化の基幹部分の開発建設を主軸として完遂する。中間評価実施までに、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の開発建設を完了した。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開発を完了して導入準備を整えた。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。

**計画研究 A02** 期間内には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により、重クォークバリオンの精密測定を行い、ダイクォーク自由度の抽出を目指す。また、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、中間子バリオン(ハドロン分子)の有効自由度、分離度を導出することを目標としている。中間評価時までには、それぞれで用いる大型スペクトロメータの建設が順調に進行した。J-PARCにおいては、高レート対応の飛跡検出器群の製作を完了し、これを中核としたビームラインスペクトロメータをほぼ完成させた。また、これまで不確定要素の一つであったバックグラウンドを評価する実験を、米国フェルミ国立研究所、ENPHATIC実験の一部として行う国際研究協力体制を確立した。現在、最初のデータ収集をR2年度中に行えるよう実験の準備を進めている。一方、SPring-8においては、スペクトロメータ周りの主要検出器の整備がほぼ完成した。

#### 公募研究 A02 関連

**加藤**：チャームバリオン内でのダイクォークを調べるため、量子数、未知の崩壊モードを解明する。

**白鳥**：オメガバリオンの研究のため高レート耐性のチェレンコフ時間検出器を開発する。

**宮林**：チャーモニウム中間子+光子への崩壊に着目し新奇ハドロン状態を探索する。

**石川**：核子励起状態構造解析のため $\eta$ メソン・核子の相互作用の導出を目指す実験を行う。

**計画研究 B01** (i)  $\Sigma^+p$  散乱実験(J-PARC E40)をR2年度中に実施し、領域設定期間内に $\Sigma^+p$ 散乱断面積を過去の100倍の統計で求めることを目指している。これまでに、K1.8ラインにKURAMAスペクトロメータ、開発した反跳陽子検出器システムCATCHを設置・調整のち、H31年初頭に実験を実施し、 $\Sigma^+p$ 散乱、 $\Sigma^+p$ 散乱ともに予定の統計量のデータを取得できた。取得したデータの解析も順調に進んでいる。(ii) Hダイバリオン探索実験(E42)は、R3年前半に実験実施の予定、領域設定期間内に解析結果を報告する予定である。これまでにハイペロンスペクトロメータの超電導電磁石の性能テストや磁場測定、モニター系の整備を行い、飛跡検出器(TPC)の性能テストと改良にも成功した。他の付属検出器も整備し、実験準備は順調に進んでいる。(iii)  $\Xi$ ハイパー核分光実験(E70)は、R2年までに検出器系の製作・準備を進め、領域設定期間内にS-2SスペクトロメータをK1.8ラインに設置して実験を実施する予定。これまでにエアロジェル検出器の製作や飛跡検出器メンテナンスが順調に進んでいる。また、 $\Xi$ 原子核相互作用の研究を総合的に進めるため、J-PARCで実施済みのエマルジョン実験(E07)の高度な画像解析をR2年に開始するとともに、 $\Xi$ 原子のX線分光実験(E03)もR3年初めに実施、領域設定期間内にいずれも新しいデータを公表することを目指している。現時点で順調に画像解析と実験準備が進んでいる。

#### 公募研究 B01 関連

**仲澤**：ストレンジネス=-2のハイパー核を、高速解析装置開発によりエマルジョンで探索する。

**計画研究 B02** (i) 多中性子クラスターの研究：中性子過剰核の表面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における $^{11}\text{Li}$ の陽子準弾性散乱実験により探索する。R2年度までに本実験の要となる反跳陽子検出器(シリコン飛跡検出器+全エネルギー検出器)を完成させ、R3年度に実験予定である。中間評価時までには全エネルギー検出器を建設する。実際、R1年度にほぼ完成し、テスト実

験で基本性能を確認した。シリコン飛跡検出器はダルムシュタット工科大学との共同研究で進めており、順調に建設が進んでいる。(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を実現し、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している。陽子・ $^3\text{He}$ 散乱のスピン観測を高効率で測定する高偏極高密度 $^3\text{He}$ 標的建設を進め、完成させた。また、阪大RCNP、東北大CYRICにおいて中間エネルギーでの陽子 $^3\text{He}$ 弾性散乱の高精度測定を実現した。(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：三体核力の効果を持つ(p,pN)反応のスピン観測完全セット測定を実現し、核媒質中での核力を決定する。既に反跳陽子のスピン測定のための検出器・偏極度計の読出し高速化の設計・整備を行った。また、多線式飛跡検出器の建設を順調に進めている。

#### **公募研究 B02 関連**

**堂園**：原子核の対相関が引き起こす新種の巨大共鳴(巨大対振動)を探索する。

**川畑**：未知の $\alpha$ 凝縮状態を探索するため大立体角シリコン半導体検出器を開発する。

**計画研究 C01** 領域設定期間内に、異なる質量比の粒子・クラスターで構成されるハドロンや原子核系の量子シミュレーターとなることも期待される、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、その特異な性質を実験的に解明することで、クラスターや階層の物理の理解を深化させる。特に、重原子-軽原子間の相互作用を磁場により制御するフェッシュバッハ共鳴法を確立し、セミ階層に属するフェッシュバッハ分子について分光的手法を駆使して「分離度」の定量的理解を得る。次に、「普遍的なクラスター状態」としてのエフィモフ3量体を観測し「閾値則」としてのエネルギー構造の解明を行う。また軽原子との相互作用により重原子間に発生する「有効的力」の湯川型からエフィモフ型への変遷の解明などを旨とする。中間評価実施時までには、Er、Yb、およびLi原子からなる新規の3種原子混合系に焦点を絞り、そのためのレーザー冷却用光源、混合原子用オープンデザイン・製作し、上記3種混合超低温原子集団の光トラップ技術を世界で初めて確立した。

#### **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う。

**計画研究 C02** 領域設定期間内に冷却原子を用いて粒子間の相互作用・温度・スピンバランスを制御し、熱力学量・磁気感受率・粘性率・光学応答の精密測定により、量子クラスターの静的物性・動的物性・波動関数を明らかにし、セミ階層における量子クラスター形成過程の基本物理の基礎を固める。中間評価実施時までにはユニタリー極限における体積粘性率の測定、s波散乱長依存の状態方程式の測定、4次ビリアル係数測定の予備実験に取り組み、理論研究でs波散乱長依存の状態方程式、核物質中の $\alpha$ 粒子、ポーラロン問題に取り込む計画を立てていた。理論研究は計画通り遂行し実験結果と比較する準備が済んでいる。実験研究においてはフェッシュバッハ分子の分光実験が大きく進展した。この実験は今後の精密測定に必須であるだけでなく、孤立粒子が複合粒子になる過程を理解できる重要な研究課題である。中間評価までにクラスター形成と光学応答の変化に関する普遍的物理法則を示せる予定である。H30年度にユニタリー領域における体積粘性率測定の予備実験が済み R1年度に本データを取得する予定であったが、実験室の引越し作業が生じたため中間評価後に速やかに遂行する予定である。

#### **公募研究 C02 関連**

**堀内**：核媒質中でのクラスターの役割(発現、消滅)を物理・化学的両側面から解明する。

**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について、その構造を直接測定する。

**計画研究 D01** ハドロン物理、原子核物理、原子分子科学分野に跨った「物質階層の進化のメカニズム」を理論面から解決することをD01班の最終目的とする中で、現在までに、分担者内での共同研究および連携を目指した。その結果、第一原理による相互作用の構築、その相互作用を活用した第一原理計算法の確立、さらには、原子分子分野における第一原理計算の枠組みを完成することができた。また、原子核内におけるクラスターを観測するための反応計算の枠組みを完成させることに成功した。中間評価時までには、クラスター形成の成り立ちをこれらの結果を整理することで、分野間での普遍性を暴くことを目標とする。さらに、月に一度の「クラスター」をキーワードとした戦略会議を理論班の主導のもとに開催し、分野間の連携を大いに促進・クラスター形成のメカニズム、閾値則、及び分離度についての法則の指針をたてる。

#### **公募研究 D01 関連**

**江尻**：高温高密度QCD相転移の性質を第一原理計算(格子QCD)によって明らかにする。

**兵藤**：高エネルギー衝突実験におけるハドロン間相関、弱束縛状態の構造を調べる。

**立川**：量子モンテカルロ法等を駆使し、エキゾチック分子系に対する第一原理手法を構築・実装する。  
**岡**：ハドロン中の色荷を持つクラスターの有効理論を構築し、新奇ハドロンの構造を解読する。  
**中務**：低エネルギー核反応におけるクラスターの出現・消滅機構を記述する微視的理論を構築する。  
**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する。  
**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する。  
**大塚**：動的な殻構造形成とクラスター形成を核子多体系の第一原理計算で明らかにする。

## (2) 本研究課題により得られた成果

**計画研究 A01** H30-R1 年度は、LHC 加速器が輝度向上などを目的とする高度化のために運転を休止している。この期間を有効活用し、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、R2 年度までに、ALICE 実験高度化を完遂しつつある[A01-9]。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、ALICE 実験データ収集の 2 桁高速化の実現へ向けて、H30 年度に建設を開始した大型ガス電子増幅器を主飛跡検出器のドリフト電子検出部として導入設置した。前方検出器系高度化においては、前方ミュオン粒子精密測定に向けて、H31 年度に建設を開始した新規半導体飛跡検出器について、その導入・設置と宇宙線を用いた立上げ調整の準備を進めた。データ収集系高度化においては、R2 年度内の新収集系の稼働に向けて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的に図り、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の維持拡大を図った。

**計画研究 A02** K 中間子核子のハドロン分子状態とされる  $\Lambda(1405)$  の質量ポール位置を、J-PARC における  $K^-+d$  反応実験により導出に成功した[A02-4]。この成果と SPring-8 で得られる成果を総合的に解析しハドロン分子に関する新たな知見を得る。また、 $\Lambda(1405)$  から一歩進んだハドロン分子で最も単純な中間子原子核、 $K^-pp$  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[A02-6]。この発見は B01 班との共同研究で、さらに同班が予定している別の生成反応による研究と相補的な研究成果である。このように、 $K^-pp$  状態の統一的理解には A02-B01 班の連携が重要となっている。検出器開発においては、SPring-8・LEPS2 実験用の高時間分解能飛行時間差測定器の開発を進め、世界的に開発例がほとんどない 2m もの読み出しストリップ構造を持つ検出器の製作に成功した[A02-7]。これは、同様の検出器を用いる J-PARC ハドロンスペクトロスコーピー用大型スペクトロメータの開発にも貢献する。

### 公募研究 A02 関連

**加藤**：ハドロン層の新奇クラスターに対する閾値則とも関連のあるチャームバリオン  $\Xi_c(2970)$  のスピン・パリティの決定に世界で初めて成功した。現在投稿論文を準備中である。

**白鳥**：高計数率測定可能な高精細のチェレンコフ時間検出器の開発に成功し、45ps という当初の想定を上回る高い時間分解能を得た。

**石川**： $\eta N$  散乱長決定のため  $\gamma d \rightarrow \eta pn$  反応の  $\eta n$  不変質量微分断面積を測定し、プリリミナリーな結果を得た[A02-15]。また  $\gamma p \rightarrow \omega p$  反応で決定した  $\omega p$  散乱長を論文発表した [A02-14]。

**計画研究 B01** J-PARC において  $\Sigma$  ハイペロン-陽子間力を明らかにするため、 $\Sigma p$  散乱実験(E40)を実施し、従来の 100 倍の高統計データを得ることに成功した。特に  $\Sigma^-p$  散乱についてはデータ解析を進め、その途中結果を国際会議等で発表した[B01-2,3,5]。また、J-PARC における  ${}^{12}\text{C}(K^-,K^+)$  反応(E05)のデータ解析により、 $\Xi$  ハイパー核束縛状態の存在を示すスペクトルを得て、国際会議で発表した[B01-1,6]。新たな  $K^-pp$  およびダブル  $\Lambda$  ハイパー核を観測し、論文および国際会議で発表した[B01-3,4,5,A02-6]。 ${}^{12}\text{C}(K^-,p)$  反応の包括スペクトル(E05)を解析し、 $\Lambda(1405)$  が束縛したと解釈できる深い状態 ( $K^-$  原子核の一種) であるとの示唆を得た。

### 公募研究 B01 関連

**仲澤**：過去の約 4 倍の数のストレンジネス = -2 のハイパー核の同定に成功し[B01-9]、特に炭素  ${}^{15}\Xi$  ハイパー核では核内準位構造が見られ、論文を準備している。さらに、従来の解析の 10 倍速化を実現し、機械学習手法の導入による効率的なハイパー核探索に取り組んでいる。

**計画研究 B02** (i) 多中性子クラスターの研究：複数の中性子を同時測定する手法についての論文をまとめた[B02-2]。さらに、多中性子クラスターの候補  ${}^{20,21}\text{B}$  の発見[B02-7]、中性子過剰限界の決定[B02-4]、

中性子過剰核  $^{28}\text{F}$  の構造決定[B02-3]、ダイ中性子の存在の証拠を示した中性子ハロー核  $^{19}\text{B}$  の分解反応実験[B02-1]の結果を論文発表した。[B02-1,4]は *Physical Review Letters* の *Editors' Suggestion* に採択され、[B02-4]については *Featured in Physics* にも取り上げられた。(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させ、阪大 RCNP、東北大において、中間エネルギー領域における陽子・ $^3\text{He}$  弾性散乱の高精度測定を実現した。厳密理論計算と比較し、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。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。この成果によって、本研究を主導する関口（研究分担者）は令和元年度の東北大学優秀女性研究者賞(紫千代萩賞)を受賞した。(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： スピン観測から核力を決定するには、核反応機構の理解が必須である。そこで、阪大 RCNP での実験により、核媒質効果が少ない  $^{40}\text{Ca}$  のフェルミ面近傍の軌道に対して分光学的因子を導出し、(p,pN)反応のプローブとしての確度の高さが証明された。

#### 公募研究 B02 関連

**川畑**： Si 半導体検出器の開発を行っている [B02-12]。また、 $^{24}\text{Mg}$  における  $\alpha$  凝縮状態の探索実験を JAEA タンデム加速器施設に提案し、ビームタイムが採択された。

**研究計画 C01** 巨大な質量比のエルビウムとイッテルビウム、およびリチウムの超低温原子混合系を実験対象として基盤実験技術を確立することに成功した。まず、H30 年度には、イッテルビウム原子とリチウム原子のボース凝縮体の混合次元系を生成することに成功した[C01-7]。また、新規に開発した、重いエルビウム原子と軽いリチウム原子、さらにイッテルビウム原子の 3 種混合系の生成用に特化してデザイン・作成した、ハイブリッド型オープンと新規に準備したエルビウム原子冷却用の光源を用いて、エルビウム原子単体では 500 nK までの冷却に成功するとともに、3 種原子の同時磁気光学トラップ、および 3 種原子同時光トラップに成功した。この他、当初にはない展開として、高電子励起状態であるリドベルグ原子が、セミ階層に対応するとして、イッテルビウム原子を対象として、複数の共鳴をイオン化検出により観測するなど、その分光技術を確立し、今後の系統的な測定のための基礎を確立した。

#### 公募研究 C01 関連

**小林**： 光共振器増幅された光格子を用い、先行研究の 1 万倍もの原子気体のトラップに成功し、さらに量子縮退温度に迫る冷却を実現した[C01-11,12]。まもなくエフィモフ状態生成の本実験が可能となる。

**計画研究 C02** 散乱長の時間変化による体積粘性率の測定技術を確立し[C02-8]、さらに体積粘性率を散乱長の変調周波数で測定することにより動的体積粘性率の決定の見通しが立った。また BCS-BEC クロスオーバー領域におけるせん断粘性率を理論的に研究し、この輸送係数とエントロピー密度の比に下限値が存在するとする Kovtun-Son-Starinets (KSS) 予想を検証した[C02-3]。この成果は冷却原子系のみならず、粒子階層をまたぐ普遍的な基礎物理として極めて重要な知見である。フェッシュバッハ分子から成る量子多体系の定量測定を行うため、吸収分光法によるフェッシュバッハ分子の光学応答の実験を行い、当初予期しない成果が得られた[C02-7]。すなわち、本実験により光学応答が孤立原子の理想的な吸収スペクトルから分子的な吸収スペクトルに徐々に変化していく様子を世界で初めて捉えた。また様々な環境におけるクラスター形成を理解するため、中性子物質中の  $\alpha$  粒子の性質、天体プラズマ中のホイール状態の性質、双極子相互作用する冷却フェルミ原子気体中のポーラロンの性質、冷却フェルミ原子気体中のポーラロン多体系の衝突を理論的に研究した[C02-4]。

#### 公募研究 C02 関連

**堀内**： 恒星中で実現されると想定される熱プラズマ環境中における  $\alpha$  クラスター状態について、クーロン遮蔽効果を取り入れた理論計算に成功し、論文執筆を開始した。また、微視的 6 体計算による  $^6\text{Li}$  核の光励起について理論研究を行い、クラスター構造の役割を明らかにした[C02-10]。

**竹内**： 液晶系では 2 本の欠陥の運動が非対称で量子流体と異なることを見出した。また、乱流により生成された欠陥の緩和過程の計測から、特異的及び非特異的な線欠陥やモノポールなどの様々な欠陥の発生を観察し、これらの欠陥が相互作用・接合した大規模構造を成すことがわかった[C02-11]。

**計画研究 D01** (i) クォーク模型における散乱チャネルを陽に取り入れた枠組みの中で未発見ペンタクォークである  $\text{sssqq-bar}$  に、狭い幅の共鳴が存在することを予言した。また、この研究から、クォーク模型で取り込むことのできないハドロンクラスター間の相関が重要であることを示唆した[D01-5]。さらに、ペンタクォークバリオン  $\text{Pc}$  をハドロン・クォーク複合模型によって解析することにより、長距離のハドロ



ンクラスター間のテンソル相関と、近距離のクォーククラスター間のスピン相関によって、 $P_c$  の寿命と質量を説明した。(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)束縛状態の予言[D01-8]、 $H$  ダイバリオン $\cdot N\Xi$  閾値近傍でのポール構造を解明した[D01-4]。(iii) これらの相互作用の中でグザイ-核子間相互作用を活用し、未発見グザイハイパー核、 $NN\Xi$  に束縛状態が存在することを予言し、実験の可能性を指摘した。この成果は、H31 年 3 月にプレスリリースを行った[D01-1]。(iv) ダイポール励起モードに適した核構造模型の開発を進め、 $\alpha$  非弾性散乱、陽子非弾性における断面積を計算した結果、クラスター励起による寄与を明らかにした[D01-6,7]。(v) 量子分子動力学法を進展させることにより、「水素+重水素混合系において、拡散係数を始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へ向けて最適な混合比の提案を行った[D01-3]。本計画研究代表(肥山)は H31 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰を受賞した。

#### 公募研究 D01 関連

**江尻:** 高密度での格子 QCD 計算で問題となっている符号問題について対称性に着目した回避法を提案し、 $U(1)$ ゲージ理論や QCD でも低温相ではこの回避法が適用可能と判明した。また、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 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。

**兵藤:** 弱束縛状態の波動関数の性質とサイズの関係を導き、低エネルギー現象の普遍性との関連を明らかにした。

**立川:** 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(D01 代表)らの手法を適用し始めた。以上の成果により 第 4 回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[D01-14,15]。

**岡:** 軽いクォーク 2 個からなるダイクォークのカイラル有効理論に基づく解析を行った。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、ダイクォークの質量間の関係式を導いた。特に、軸性  $U(1)$ アノマリーの効果が、擬スカラーダイクォーク質量の逆ヒエラルキーを与える現象に注目し、チャームバリオン  $\Xi_c$  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[D01-16]。

**中務:** 微視的理論に基づき、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 $\cdot$ の導出に成功した[D01-18]。低エネルギー反応における集団質量効果を明らかにし、深部サブバリア核融合反応断面積の著しい低下を説明できる可能性が示唆された。また、核子対凝縮を取り入れ、有限温度ハートレー・フォック・ボゴリューボフ理論に基づく 3D 非制限計算法を開発し、中性子星クラスタにおけるクラスタ出現に応用した[D01-17]。

**大西:** QCD から得られた  $\Omega N$  相互作用による  $p\Omega$  相関関数の研究を進めた。新たに開発した誤差評価方法を用いてデータを分析し、格子 QCD からの  $\Omega N$  相互作用を検証するとともに、相関関数データが  $\Omega N$  束縛状態の存在を示唆することを論じた。 $pK$  相関関数についても研究を進めている[KB-D01-19]。

**鹿野:** 結合クラスター法の拡張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およびそのノイズ耐性に関して調査を行った。更に、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ノイズモデル構築に成功した。

**大塚:** 殻模型に基づく世界最大級のモデル空間で、原子核の第一原理計算の開発に成功し、 $\alpha$  クラスタ一核に応用した。 $^{12}\text{C}$  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た。また  $\alpha$  クラスタ生成に関して、ベリリウムと炭素それぞれについて、その形成メカニズムが分かり、論文準備中である。一方、クラスタ形成に加えて、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。自己組織化に基き、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[D01-22]。これは Physical Review Letters 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。

## 6 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、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和2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 (CLUSHIQ2020) (2020/1/23-24, Beppu, Japan)

### 計画研究 A01 - 【雑誌論文】 (H30-R1 年度: 査読付論文 95 報, R2 年度 同 7 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), "Scattering studies with low-energy kaon-proton femtoscopy in proton-proton collisions at the LHC", *Phys. Rev. Lett.* **124**, 092301(2020). 査読有
- A01-2. 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
- A01-3. 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
- A01-4. 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
- A01-5. A.Adare, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (PHENIX Collaboration), "Beam Energy and Centrality Dependence of Direct-Photon Emission from Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions", *Phys. Rev. Lett.* **123**, 022301 (2019) 査読有
- A01-6. S.Acharya, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (ALICE Collaboration), "Azimuthal Anisotropy of Heavy-Flavor Decay Electrons in p-Pb Collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV", *Phys. Rev. Lett.* **122**, 072301 (2019). 査読有
- A01-7. C.Aidala, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (PHENIX Collaboration), "Creation of quark-gluon plasma droplets with three distinct geometries", *Nature Phys.* **15**, 214-220 (2019). 査読有
- A01-8. A.Adare, T.Chujo, T.Gunji, H.Hamagaki, K.Shigaki, *et al.* (PHENIX Collaboration), "Pseudorapidity Dependence of Particle Production and Elliptic Flow in Asymmetric Nuclear Collisions of p+Al, p+Au, d+Au, and  $^3\text{He}+\text{Au}$  at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV", *Phys. Rev. Lett.* **121**, 222301 (2018). 査読有
- A01-9. 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

### 計画研究 A02 - 【雑誌論文】 (H30-R1 年度: 査読付論文 22 報, R2 年度 同 1 報)

- A02-1. 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
- A02-2. 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
- A02-3. \*T. Hashimoto, S. Aikawa, H. Noumi, H. Ohnishi et al. "Kaonic Atom Experiments at J-PARC", *JPS Conf. Proc.* **26**, 023013(2019), 査読有
- A02-4. S. Kawasaki, S. Aikawa, H. Noumi, H. Ohnishi, et al, " $\Lambda(1405)$ Spectroscopy via the In-flight  $d(K,n)$  Reaction at the J-PARC K1.8BR", *JPS Conf. Proc.* **26**, 022009 (2019). 査読有
- A02-5. Y. Komatsu, J.K. Ahn, M. Naruki, H. Noumi et al. "Experimental Study of Di-quark Correlation by Charmed Baryon Spectroscopy at J-PARC High-Momentum Secondary Beam Line", *JPS Conf. Proc.* **26**,



022029 (2019). 査読有

A02-6. S. Ajimura, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, \*T. Yamaga et al., “ $K^-pp$ ”, a  $K^-$ -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**

A02-7. K. Watanabe, M. Niiyama, H. Ohnishi, M. Yosoi, et al., “A compensated multi-gap RPC with 2 m strips for the LEPS2 experiment”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **925**, 188 (2019)., 査読有

-【学会発表】(H30-R1年度: 51件、内国際学会21件、招待講演19件)

A02-8. H. Noumi, “High-momentum pion beamline at J-PARC and Open Charm Production”, Reimei Symposium on “Synergies in Hadron Physics between J-PARC and JLab”, (2020/10/5, Jefferson Lab., Virginia, USA), 招待講演

A02-9. H. Ohnishi, “ $\phi$  meson in nucleus”, STRANEX: Recent progress and perspectives in STRANge EXotic atoms studies and related topics, (2019/10/21-25, ECT\*, Trento, Italy) 招待講演

A02-10. M. Niiyama, “Hadron physics with photon beam”, The 3rd J-PARC symposium (J-PARC2019), (2019/9/24-26, Tsukuba, Japan), 招待講演.

**公募研究 A02 関連** - 【学会発表、雑誌論文】

A02-11. Y. Kato, “Baryon Spectroscopy at Belle”, EPS-HEP 2019 (2019/7/10-17, Ghent, Belgium)

A02-12. K. Miyabayashi, “Heavy Flavor Hadron Physics at Belle and Belle II”, 10<sup>th</sup> Anniversary J-PARC Symposium 2019, (2019/9/23-27, 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター) 招待講演

A02-13. T. Akaishi, K. Shiratori for the J-PARC E50 collaboration, “Development of high-rate Cherenkov timing counter with MPPC”, International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020), 2020/1/23-24, Beppu, Japan) Poster

A02-14. \*T. Ishikawa, H. Fujimura, H. Fukasawa, R. Hashimoto, et al., “ $\omega N$  scattering length from  $\omega$  photoproduction on the proton near the reaction threshold”, Phys. Rev. C **101**, 052201 (R) (2020). 査読有

A02-15. T. Ishikawa, “ $\eta N$  scattering parameters and possible  $\eta N$  bound state from  $\eta$  photoproduction on the deuteron”, 3rd Jagiellonian Symposium on Fundamental and Applied Subatomic Physics (2019/6/23-28, Krakow, Poland)

**計画研究 B01** - 【雑誌論文】(H30-R1年度: 査読付論文18報)

B01-1. \*T. Nagae, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Observation of a  $\Xi$  bound state in the  $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  reaction at 1.8 GeV/c”, Proc. 13th Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP 2018), AIP Conf. Proc. **2130**, 20015 (2019). 査読有

B01-2. \*K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura et al., “ $\Sigma p$  scattering experiment at J-PARC – results of commissioning run”, Proc. 13th Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP 2018), AIP Conf. Proc. **2130**, 20006 (2019). 査読有

B01-3. \*H. Tamura, “Strangeness Nuclear Physics”, Proc. 8th Int. Conf. on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018), JPS Conf. Proc. **26**, 11003 (2019). 査読有

B01-4. \*H. Ekawa, T. Takahashi, H. Tamura 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

-【学会発表】(H30-R1年度: 24件、内国際学会19件、招待講演16件)

B01-5. H. Tamura, “Strangeness Nuclear Physics”, The 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics, (2018/11/13-17, Tsukuba Japan) 招待講演

B01-6. T. Nagae, “ $\Xi$  hypernuclei at J-PARC”, Few-Body 22 conference, (2018/7/9-13, CAEN, France) 招待講演  
-【アウトリーチ】

B01-7. 高橋俊行「「奇妙な」原子核から中性子星内部の物質を探る」ハローサイエンス (J-PARC 主催講演会) 第25回 2019年1月25日.

[http://www.j-parc.jp/symposium/Hello\\_science/Hscience1901-04.html#event25](http://www.j-parc.jp/symposium/Hello_science/Hscience1901-04.html#event25)

B01-8. 田村裕和「J-PARC 加速器で“ミニ中性子星”を作る—最先端の原子核物理学—」J-PARC 講演会、J-PARC、2018年8月19日 [http://j-parc.jp/OPEN\\_HOUSE/2018/details01.html#details01-top](http://j-parc.jp/OPEN_HOUSE/2018/details01.html#details01-top)

**公募研究 B01 関連** - 【雑誌論文】

B01-9. 仲澤和馬, 「J-PARC ハドロンビームによる新種の超原子核発見」, アイソトープニュース **767** P10-13 (2020), 査読有

**計画研究 B02** - 【雑誌論文】(H30-R1年度: 査読付論文 35報, R2年度 同3報)

- B02-1. \*K.J. Cook, T. Nakamura, Y. Kondo et al., “Halo Structure of the Neutron-Dripline Nucleus  $^{19}\text{B}$ ”, Phys. Rev. Lett. **124**, 212503 (2020). **Editors’ Suggestion** 査読有
- B02-2. \*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
- B02-3. \*A. Revel, O. Sorlin, F.M. Marques, Y. Kondo, J. Kahlbow, T. Nakamura, N.A. Orr et al., “Extending the Southern Shore of the Island of Inversion”, Phys. Rev. Lett. **124**, 212503 (2020). 査読有
- B02-4. DS Ahn, N. Fukuda, \*T. Kubo, T. Nakamura et al., “Location of the Neutron Dripline at Fluorine and Neon”, Phys. Rev. Lett. **123**, 212501(2019). **Editors’ Suggestion**, **Featured in Physics**, 査読有
- B02-5. \*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
- B02-6. \*S. Takeuchi, T. Nakamura, et al., “Coulomb breakup reactions of  $^{93,94}\text{Zr}$  in inverse kinematics”, Prog. Theor. Exp. Phys. **2019**, 013D02 (2019), 査読有
- B02-7. \*S. Leblond, F. M. Marques, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “First Observation of  $^{20}\text{B}$  and  $^{21}\text{B}$ ”, Phys. Rev. Lett. **121**, 262502 (2018). 査読有
- B02-8. \*J. Yasuda, M. Sasano, R.G.T. Zegers, T. Nakamura, Y. Kondo, T. Wakasa, et al., “Extraction of the Landau-Migdal Parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in  $^{132}\text{Sn}$ ”, Phys. Rev. Lett. **121**, 132501 (2018), **Editors’ Suggestion** 査読有  
- 【学会発表】 (H30-R1 年度: 71 件、内国際学会 47 件、招待講演 26 件)
- B02-9. T. Nakamura, “Multi-neutron clusters”, 4th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Beams, (2019/10/9-13, Maresias, Brazil) 招待講演
- B02-10. 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
- B02-11. T. Nakamura, “Exploration towards the nuclear limit: neutron drip line and beyond”, 5<sup>th</sup> Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS (2018/10/23-27, Hawaii, USA) 招待講演
- 公募研究 B02 関連** - 【雑誌論文】
- B02-12. \*Y. Hijikata, T. Kawabata, Y. Kanada-En’yo, et al., “Particle Identification by Pulse-Shape Analysis with Neural Network, JPS Conf. Proc. **31**, 011050 1-4 (2020). 査読有
- 計画研究 C01** - 【雑誌論文】 (H30-R1 年度: 査読付論文9報, R2年度 同4報)
- C01-1. \*F. Schäfer, T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, “Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices”, Nature Reviews Physics, accepted (2020). 招待レビュー記事、査読有,
- C01-2. \*S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa and Y. Takahashi, “Spatial adiabatic passage of massive quantum particles in an optical Lieb lattice”, Nature Communications, **11**, 257-1-6 (2020). 査読有
- C01-3. \*M. Borkowski, A. A. Buchachenko, R. Ciurylo, P. S. Julienne, H. Yamada, Y. Kikuchi, Y. Takasu and Y. Takahashi, “Weakly bound molecules as sensors of new gravitylike forces”, Scientific Reports **9**, 14807-1-7 (2019). 査読有
- C01-4. \*T. Tomita, S. Nakajima, Y. Takasu and Y. Takahashi, “Dissipative Bose-Hubbard system with intrinsic two-body loss”, Phys. Rev. A, **99**, 031601(R)1-6 (2019). **Rapid Communication** 査読有,
- C01-5. \*K. Nagao, M. Kunimi, Y. Takasu, Y. Takahashi, I. Danshita, “Semiclassical quench dynamics of Bose gases in optical lattices”, Phys. Rev. A **99**, 023622-1-11 (2019). 査読有
- C01-6. \*K. Ono, J. Kobayashi, Y. Amano, K. Sato, and Y. Takahashi, “Antiferromagnetic interorbital spin-exchange interaction of  $^{171}\text{Yb}$ , Phys. Rev. A, **99**, 032707-1-7 (2019)
- C01-7. \*F. Schäfer, N. Mizukami, P. Yu, S. Koibuchi, A. Bouscal, and Y. Takahashi, “Experimental realization of ultracold Yb-7Li mixtures in mixed dimensions”, Phys. Rev. A **98**, 051602(R)1-6 (2018). **Editors’ Suggestion**, **Rapid Communication** 査読有  
- 【学会発表】 (H30-R1 年度: 56 件、内国際学会 23 件、招待講演 30 件)
- C01-8. 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
- C01-9. 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】

C01-10. 2019年9月15日：京大アカデミックデイ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】

C01-11. J. Kobayashi, “Research on ultracold few-atomic molecules using ionization detection”, International symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020) (2020/01/23-24, Beppu, Japan) 招待講演

C01-12. J. Kobayashi, “Test for the stability of the electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules”, 12th International 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-R1年度：査読付論文 26 報)

C02-1. \*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

C02-2. \*K. Iida, E. Itou, and T.-G. Lee, "Two-colour QCD phases and the topology at low temperature and high density", Journal of High Energy Physics 2020, 181(1-21) (2020). 査読有

C02-3. 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(1-10) (2019). 査読有

C02-4. J. Takahashi, R. Imai, E. Nakano, and \*K. Iida, "Bose polaron in spherical trap potentials: Spatial structure and quantum depletion", Physical Review A 100, 23624(1-9) (2019). 査読有

C02-5. \*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

C02-6. Y. Chen, \*M. Horikoshi, K. Yoshioka, M. Kuwata-Gonokami, “Dynamical Critical Behavior of Attractive Bose-Einstein Condensate Phase Transition”, Phys. Rev. Lett. **122** 040406 (2019). 査読有

- 【学会発表】 (H30-R1 年度：67 件、内国際学会 17 件、招待講演 21 件)

C02-7. 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

C02-8. 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

C02-9. 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、学会発表】

C02-10. \*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

C02-11. K. A. Takeuchi, “Disclination turbulence - from defect dynamics to macroscopic scaling laws -”, ‘2019 Gordon Conference on Liquid Crystals, Soft Order and Topology Motives in Biomedicine, Nanoscience, Cosmology, Living Matter and Emergent Industries’, (2019/7/10, New London (USA)), 招待講演.

**計画研究 D01** - 【雑誌論文】 (H30-R1 年度：査読付論文 43 報 R2 年度 7 報)

D01-1. \*E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto, “Possible Lightest  $\Xi$  hypernucleus with Modern  $\Xi N$  interaction”, Phys. Rev. Lett. **124**, 092501 (2020). 査読有

D01-2. \*Y. Yamaguchi, H. Garcia-Tecocoatzi, A. Giachino, A. Hosaka et al., “Pc pentaquarks with chiral tensor and quark dynamics, Phys. Rev. D **101**, 091502(R) (2020). 査読有

D01-3. \*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

D01-4. 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

D01-5. \*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

- D01-6. \*Y. Kanada-En'yo and Y. Shikata, "Isoscalar dipole excitations in  $^{16}\text{O}$ ", Phys. Rev. C **100**, 014301 (2019).  
 査読有
- D01-7. \*Y. Kanada-En'yo and K. Ogata, "Microscopic calculation of inelastic proton scattering of  $^{18}\text{O}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{Be}$ , and  $^{16}\text{C}$  for study of neutron excitation in neutron-rich nuclei", Phys. Rev. C **100**, 064616 (2019). 査読有
- D01-8. \*T. Iritani, S Aoki, T. Doi, et al., "N $\Omega$  dibaryon from lattice QCD near the physical point", Phys. Lett. B **792**, 284 (2019). 査読有
- D01-9. Pascal Naidon, Ludovic 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-R1 年度: 57 件、内国際学会 38 件、招待講演 38 件)
- D01-10. D01-9. A. Hosaka, "Threshold peaks in heavy hadrons Pc", Inha Hadron Mini Workshop, (2019/6/17-18, Inha University, Incheon, Korea) 招待講演
- D01-11. 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
- 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
- 公募研究 D01 関連** - 【雑誌論文】  
 (掲載順については、5. 研究の進展状況及び主な成果の当該箇所(P13)に準じた)
- D01-13. \*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
- D01-14. A. Io, T. Kawatsu, and, 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
- D01-15. H. Sugimoto, M. Tachikawa, and T. Udagawa\*, "Multicomponent QM study on the reaction of HOSO + NO $_2$  with H $_2$ O: Nuclear quantum effect on structure and reaction energy profile", **Int. J. Quant. Chem.**, e25895 (2019). **Cover Image** 査読有
- D01-16. \*Y. Kim, E. Hiyama, M. Oka, K. Suzuki, Phys. Rev. D, in press, 査読有 **D01 肥山との共著**
- D01-17. Y. Kashiwaba and T. Nakatsukasa, "Coordinate-space solver for finite-temperature Hartree-Fock-Bogoliubov calculation using the shifted Krylov method", Phys. Rev. C in press; Preprint arXiv:2001.00500. 査読有
- D01-18. K. Wen and T. Nakatsukasa, "Collective inertial masses in nuclear reactions", Front. Phys. **8**, 16 (2020) [8 pages]. 査読有
- D01-19. K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, Y. Kamiya, \*A. Ohnishi "Probing  $\Omega\Omega$  and p $\Omega$  dibaryons with femtosopic 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**
- D01-20. \*K. Kashiwa, Y. Mori, A. Ohnishi, "Application of path optimization method to the model sign problem in QCD effective model with repulsive vector-type interaction", Phys. Rev. D **99**, 114005 (1-7). (2019). 査読有
- D01-21. M. Bando, T. Ichikawa, \*Y. Kondo, N. Nemoto, M. Nakahara, Y. Shikano, "Concatenated Composite Pulses Applied to Liquid-State Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy", Scientific Reports **10**, 2126 (2020). 査読有
- D01-22. T. Otsuka, Y. Tsunoda, T. Abe, N. Shimizu, and P. Van Duppen, "Underlying Structure of Collective Bands and Self-Organization in Quantum Systems", Phys. Rev. Lett., **123**, 222502 (2019). **Editors' Suggestion** 査読有
- D01-23. T. Otsuka, A. Gade, O. Sorlin, T. Suzuki, and Y. Utsuno, "Evolution of shell structure in exotic nuclei", Rev. Mod. Phys. **92**, 0125002 (2020). 査読有

## 7 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4に示すように、実験研究を主とする計画研究A,B,C各班と理論研究のD班、公募研究は、「閾値則」「力」「分離度」「自由度」の階層を解く4つの指標や関連するキーワードを介して連携する。すなわち、各計画研究や公募研究は、階層内で密接に連携するだけでなく、こうした指標・キーワードを通じて、スケールを超えた階層間で、さらには実験研究と理論研究の間で連携し、研究を進める。

例えば、冷却原子系(C01班)が「質量比」や「力」をコントロールすることにより超低温原子混合系でのエフィモフ3量体を研究するが、これは、公募研究の小林が取り組む相補的なエフィモフ状態、B02班が研究する原子核の3体系(多中性子クラスター、三体核力)、B01,A02班が研究するK<sub>pp</sub>などの中間子原子核などの3体系、さらにはA01,A02班が研究する重クォークバリオン(チャームクォーク+2つの軽いクォークの系)などとも共通の物理で議論できる可能性があり、「力」「閾値則」「自由度」「分離度」いずれにも関わるテーマである。これを、D01班が少数系厳密計算、第一原理計算で解釈し、階層を超える物理法則を見出していくという流れができる。「3. 研究領域の目的及び概要」の図2(p.5)に示したように、A班がハドロン層、B班が原子核層にそれぞれ現れる新奇クラスター現象を調べて「相互作用のスケール」対「分離度」などの二次元上でプロットし、一方でC班が制御可能な冷却原子系を駆使した実験で量子シミュレーションを行い、D班が第一原理計算を行って理論曲線を引くことにより、階層を超えた普遍性が明らかになる。さらに、新奇クラスターに関する物理量の、普遍性からのずれは各階層の特徴・個性であり、ここから物質階層の多様性が明らかになるという流れを作る。

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並んだ。川畑の $\alpha$ 凝縮はB02班の不安定核を中心とする研究と相補性をもつ安定核の励起状態におけるクラスター現象を扱う。仲澤のエマルジョンによるストレンジネス=-2のハイパー核研究は、B01班の $\Xi$ ハイパー核分光やHダイバリオン探索と相補的だが、B01班はその重要性を認識し計画研究としても仲澤氏と連携してエマルジョン解析の一部を進めることとなった。加藤のチャームバリオンの研究はA02班がカバーしていなかったBELLE II実験の成果を取り込むもので、A02班がJ-PARC/SPring-8で行う重クォークバリオンの観測と相補的である。

総括班は「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」等を活用して研究間の連携をプロモートする。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る。このように、本領域は強力な連携体制を築いており、研究期間後半には、さらに物質階層を繋ぐ具体的な成果を出せるものと期待される。

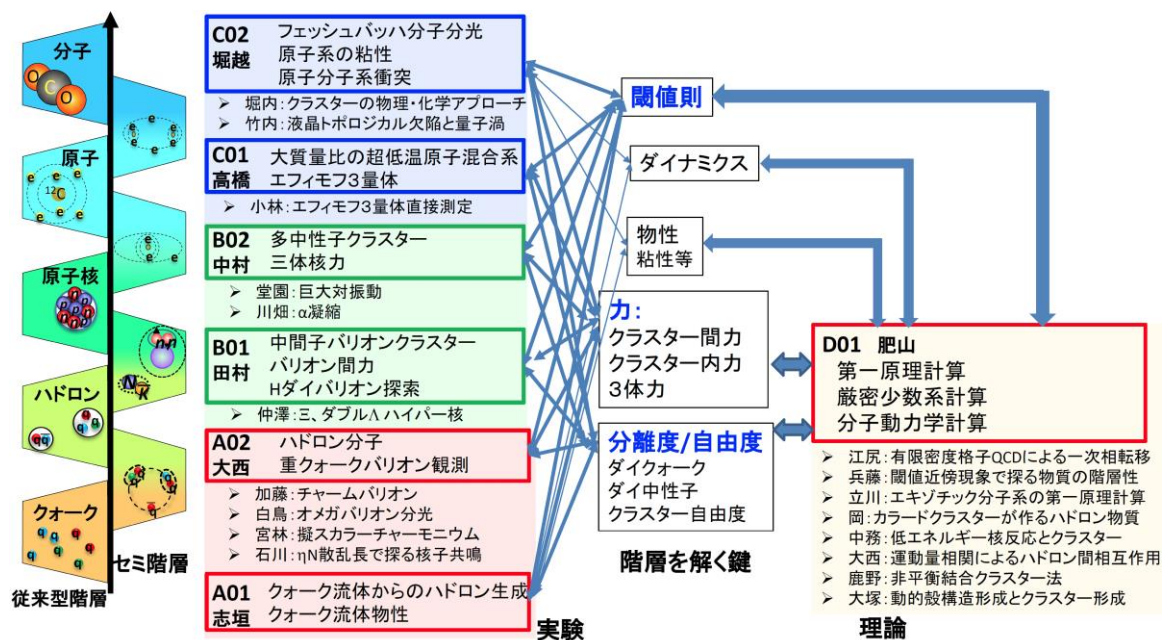


図4 本領域の連携体制



## 8 若手研究者の育成に係る取組状況

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2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。）の育成に係る取組状況について、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なっている。

**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毎年1回開催している。本領域の分野は多岐にわたっているため、自分の専門から離れた分野の学問分野、研究の状況を理解することが特に重要である。また、若手の発表機会も設け、若手の研究をプロモートしている

**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ている。これまで6回行った。R1年度にはミニワークショップを合わせて行い、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1～2年に1度開催し、若手が世界の研究動向を知る機会としている。CLUSHIQ2020（R1年度）では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2名に表彰した。この時期を活用し、若手を意識した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ングス核国際スクール(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ている。

**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ている。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。

**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** : (学生の学年は受賞当時)

- ・ Zhadyra Omar (A02、阪大 D2), 橋本賞 & ANPhA 1<sup>st</sup> Prize, SNP School 2019(R1 年度)
- ・ Zhadyra Omar (A02、阪大 D1), ANPhA 3rd Prize, SNP School 2018 (H30 年度)
- ・ 赤石貴也 (A02、阪大 M2) 修士論文賞 (H30 年度、ハドロンホールユーザー会)
- ・ 藤岡徳菜 (B01、東北大 M2) 修士論文賞 (H30 年度、ハドロンホールユーザー会)
- ・ 松田薫平 (B01、東北大 M2) 修士論文賞 (H30 年度、ハドロンホールユーザー会)
- ・ 藤田真奈美 (B01、東北大 D3) 青葉理学振興会・黒田チカ賞 (R1 年度、東北大)
- ・ 井上南 (B02、東北大 学部 4) 日本物理学会・学生優秀発表賞 (H30 年度、日本物理学会)
- ・ 北山翔 (B02、東北大 学部 4) 日本物理学会・学生優秀発表賞 (R1 年度、日本物理学会)
- ・ 渡邊跡武 (B02、東北大 D3) 東北大学総長賞 (R1 年度、東北大)
- ・ 延興紫世 (B02、京大 M1) 優秀ポスター賞 (R1 年度 国際シンポジウム CLUSHIQ2020)
- ・ 小野滉貴 (C01、京大 D2) 日本物理学会・学生優秀発表賞 (R1 年度、日本物理学会)
- ・ Yonghree Kim (D01、九大 M1) 優秀ポスター賞 (R1 年度 国際シンポジウム CLUSHIQ2020)

◇ **学術分野への就職** : 藤田真奈美 (B01 班、東北大博士学生)→特任助教(東北大, R1 年 12 月着任)

◇ **昇進実績** : 山口頼人(A01 班 特任助教, H30 年度)→准教授(広島大, R2 年 4 月着任)

	代表・分担		ポスドク		特任助教		研究協力者		学位	
	若手	全体	若手	全体	若手	全体	若手	全体	修士	博士
計画研究 A01	0	4	0	0	1	1	5	20	7	2
計画研究 A02	0	5	0	0	2	2	7	15	5	0
計画研究 B01	0	4	0	0	2	2	8	21	5	2
計画研究 B02	1	5	1	1	1	1	8	23	13	1
計画研究 C01	0	2	0	0	0	0	0	1	6	2
計画研究 C02	0	3	0	0	1	1	1	2	6	1
計画研究 D01	0	6	1	1	1	1	5	9	0	1
公募研究	6	18	1	1	0	0	31	61	1	0
計	7	47	3	3	8	8	65	152	43	9

表3 本領域研究に参加している若手の人数等。ポスドク、特任助教:本研究費での雇用者のみ。

## 9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、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、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

研究費の大きな部分を占める設備費等を有効に活用するため、総括班により「検出器ワークショップ」を開催し、検出器、検出技術などで情報共有を促進している。

**総括班 X00** 領域研究会、スクール、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、国際シンポジウムの旅費、開催費用、海外著名研究者の招聘費用、事務補佐員の雇用費等に活用し、連携強化を進めた。今後は、計測技術機器の共有化促進にも力をいれる。

**計画研究 A01** ALICE 実験高度化のため、前方ミュオン粒子飛跡検出器、主飛跡検出器のドリフト電子検出器、実験共通読出系の開発建設を進めた。同時にグリッド計算拠点の計算資源を追加購入し整備を進めたが、領域他班にも共有可能である。旅費は研究者・大学院学生の現地派遣費用等である。また、研究代表者分担者らの実験参加登録費を支出した。R2年3月まで雇用した特任助教1名(広大)は同年4月に准教授(無期雇用、広大)に着任し、本研究課題を継続する。今後、研究員1名の雇用を検討する。

**計画研究 A02** J-PARC チャームバリオン分光用ファイバートラッカー、及び大型ドリフトチェンバーの建設を行う。研究推進のため特任研究員1名(東北大)を雇用し、高時間分解能 ToF 検出器の研究開発を実施した。光検出器信号増幅器の開発、高速データ収集システム構築等を進めた。本開発は領域内で共有可能である。SPRING-8/LEPS2 実験では、特任助教1名(阪大)を雇用し、実験装置整備を実施。これまでに前方ドリフトチェンバー完成、粒子識別用エアロゲル検出器の開発が終了した。大型飛跡検出器等の読み出し回路量産、データ収集システム構築を実施。次年度よりデータ収集を開始する。

**計画研究 B01** E ハイパー核分光実験用のドリフトチェンバーのワイヤーフィードスルーピンを製作した。このための金型を作ったが、これを用いて様々なドリフトチェンバー製作に不可欠なフィードスルーピンが安価に作れるようになるので、本領域の他の実験や、原子核・素粒子分野の別の研究にも大きく貢献する。その他の実験では、水素、重水素、ヘリウム3の低温液体標的を用いるため、液体標的の開発・運転のために特殊な技術をもった専門家を雇用し、これらの標的の開発と運転の支援を行っている。この研究支援は、本班だけでなく、同種の支援や助言を必要とする他班へも広げていく。

**計画研究 B02** 多中性子クラスター生成実験に向けて特任助教1名を雇用している。初年度には、データ解析のための研究員1名を雇用した。また、同実験で用いる反跳陽子検出器について、全エネルギー検出器の建設のため CsI(Na)の購入を進め、またシリコン飛跡検出器の開発・建設を進めた。三体核力の研究では、縦型偏極の $^3\text{He}$ 標的を建設し、東北大 CYRIC、大阪大学 RCNP、理研において偏極 $^3\text{He}$ 標的を用いた高精度少数核子系実験を進めた。今後、偏極標的のシステム拡張、検出器整備のため特任助教を雇用、理研 RIBF 等での実験へと展開する。(p,pN)反応のスピンの観測の完全測定による核力の精密化では、反跳陽子のスピンの測定のための多線式飛跡検出器(MWDC)の製作と読み出し高速化を行った。

**計画研究 C01** 重い原子を含む極低温原子系の構築のための高安定光源を製作した。このための高出力紫外光源を、高出力半導体レーザー光源をもとに作ったが、この仕様で高出力の波長変換が可能になるので他の光源開発にも大きく貢献する。また、レーザー冷却のための高安定レーザー周波数安定化装置を、高精度波長計をもとに製作した。上記は専用で、各班との共同研究のために利用する。今後は、これまでに開発した装置をもとに研究を進めるとともに、さらに研究開発を進めるための装置購入を行う。

**計画研究 C02** 当初予定していたポスドクの雇用を令和元年度から行ったため、これを実験用物品費に運用した。その他は計画通り運用し、実験用データ解析用のワークステーション、レーザーシステム用物品費、相互作用制御用電源、理論研究には数値計算用ワークステーションを導入し、計画通り研究が進んでいる。R1年に代表(堀越)の大阪市立大への異動に伴い実験装置を移動した。これにより、予定外の出費が生じる可能性がある。特に50Hzの東日本から60Hzの西日本への移動のため、冷却水循環装置等いくつかの機器を買いかえの必要があり、今後の運用に注意が必要である。

**計画研究 D01** 理論研究を主とする班であるため、ポスドク2名の人件費の他、研究会、国際研究集会関連の旅費、開催費用が大半を占める。領域研究会、物質階層を横断する会、国際レクチャーシリーズ、国際シンポジウムの旅費や海外からの研究者の招聘では、総括班でカバーできない部分を補うなどの役割を果たしている。今後は代表(肥山)がチェアを務める国際会議 APFB2020 の開催においても、総括班と共に経費を使用する予定である。



## 10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「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2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本領域研究では、以下1.のように、総括班が主導して戦略的に今後の連携研究の強化をはかる。さらに、公募研究との連携、測定技術・検出器の共用促進、若手の育成、国際的ネットワークの構築、アウトリーチ活動の強化を行い、異なる物質階層をつなぐ新たな融合領域の創成を実現したい。

### 1. 戦略的な連携研究の促進

本領域は、クォーク、ハドロン、原子核、原子、分子というスケールが何桁も異なる物質の階層を貫く普遍性を探ることを目指しており、そのために計画研究各班、公募研究の連携を強化することが重要である。「力」「自由度」「閾値則」「分離度」の指標について、これまでは、物質階層間で議論を進めながらも、研究は主として階層毎に進展させてきた。今後は、各物質階層における研究を、階層を超えて有機的に結びつけ、上記4つの指標を共通の指標として結実させることが最重要課題となる。そこで、「物質階層を横断する会」「国際レクチャーシリーズ」や「領域研究会」、インフォーマルミーティング等を積極的に活用して、それぞれの階層での指標を整理した上で、階層を貫く指標を統一し（統一できない場合、何が階層の個性かを明らかにし）、普遍的なクラスター生成の機構、階層を貫く法則を明らかにすることを目指す。

総括班は、R1年12月には戦略会議を開き、階層を繋ぐ重点7テーマを決定した。これらは上記の「指標」の確立にも関連している。重点テーマは以下の通りある。

- ◇ 粘性、完全流体挙動（計画研究 A01,C01,C02,D01）
- ◇ 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）
- ◇ 3体力（B01,B02,C01,C02,D01）
- ◇ 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）
- ◇ 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）
- ◇  $\alpha$ クラスターと冷却原子のSU(4)系（B02,C01,D01）
- ◇ 核力の媒質効果（B01,B02,D01）

### 2. 公募研究について

- ・ 公募研究との連携強化：異なる階層を貫く研究を進める上で、公募研究との連携が重要である。上記の重点研究テーマに公募研究に参加してもらうことにより連携研究の有機的強化を図る。関連する計画研究と公募研究の研究者が主講演者となるような「物質階層を横断する会」の機会を設け、共同研究に繋げていきたい。さらに、計画研究と公募研究の研究者が一堂に会する研究会を年に2度程度開催するとともに、公募研究の代表を若手研究者向けのスクールの講師にして、特定のテーマについて若手が深く学ぶ機会も設ける。
- ・ 今後公募する公募研究の役割：現在の公募研究と同様、計画研究と相補的であること、計画研究との連携研究を推進できることが期待される役割である。特に、上記の重点研究テーマに即した公募研究の参加を重視したい。

### 3. 測定技術・機器の共用・共有促進

R1年度には新学術領域「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。（高橋忠幸代表）」との合同検出器ワークショップを開催した。同領域が進める様々な先端的検出器の情報に触れることができ、活発な議論が交わされ、有意義な会となった。今後は、領域内においても検出器ワークショップを開催していく。

測定技術・共用化促進は、広義に捉えている。重要なのは実検出器の共有というよりは、検出技術、データ解析法の共有であり、これにより、実験的研究がより進展する。具体的には光検出器の読み取り回路、超低温の水素・重水素標的、機械学習を使ったデータ解析手法などで計画研究・公募研究の

間での情報共有を含めた共用化の促進が可能だと考えている。B01 班代表の田村を中心としたタスクフォースを組み、この取り組みを進めていく。R2 年度秋には、A02,B01,B02 班は今後 J-PARC, RIBF, SPing-8 等の実験で必要となる高速読出し回路系の共同開発を、A01 班と KEK 回路グループの協力のもとでスタートさせることとしている。

#### 4. 若手研究者の育成

この領域は、クォーク・ハドロン物理、原子核物理、原子物理、分子科学の実験・理論研究による物質の階層を横断する領域研究となっている。そのため、自分の専門分野を越えた知識と興味を若手に持たせることが極めて重要である。これまでも、領域全体での若手向けの「スクール」を毎年開催し、さらに国際スクール(SNP スクール)も開催した。国際レクチャーシリーズでは世界的に著名な研究者がじっくり時間をかけてレクチャーをするもので若手がよく学べる機会になっている。R1 年度には国際レクチャーシリーズにミニシンポジウムのセッションを設け、若手の発表の機会を持ってもらおうと共に、海外の招聘研究者との交流をプロモートした。R1 年度に行った国際シンポジウム(CLUSHIQ2020)では若手に積極的にポスター発表をしてもらい、さらに学生を対象とした優秀ポスター発表を設け、2 名を表彰した。今後もこうした活動を継続して行うと共に、若手を意識した入門的なセミナーを各大学で行い、一方で領域研究会や国際シンポジウムにおいて若手の発表の機会を増やし、若手をプロモートする。

#### 5. 国際的ネットワークの構築

本領域は「国際レクチャーシリーズ」「国際シンポジウム」等の開催などで、海外から著名な研究者を 10 名以上招聘し、並行して、国際共同研究を実験・理論両面で大規模に行っていることから、国際的な研究ネットワークが徐々にできつつある。この取り組みを一層推進し、本領域研究の出口においては国際的にも「物質階層を横断する研究、クラスター研究」を一つの潮流としていきたい。R2 年度には D01 班代表(肥山)が議長を務める APFB2020 (Asia Pacific Conference on Few-body Problems in Physics, R3 年 3 月開催予定) の開催機会を活用し、同国際会議とそのサテライトのミニシンポジウム、セミナー、レクチャー等を通じて、世界の著名研究者を本研究テーマに巻き込んでいく。このような活動を重ね、物質階層学の国際的なネットワークを構築する。

#### 6. アウトリーチ活動の強化

本領域では、これまでも計画研究代表等によるアウトリーチ活動が行われており、領域ニュースを WEB 上ですでに Vol.8 まで発行・公開している。領域代表は中性子過剰極限の物理について、パリティ編集委員会が発刊した「物理科学, この 1 年 2020」(丸善書店)の中で「中性子過剰の果てにある境界：中性子ドリップライン」を寄稿している。

今後は、アウトリーチ活動を C02 班代表の堀越と B02 班分担の関口が中心となってタスクフォースを組み、講演会などを積極的に行っていくことにしている。その第一回目を 8 月上旬に B01 班代表の田村によってオンライン講演会として行うこととした。これをシリーズ化して、アウトリーチ活動を行い、広く中高生、大学生、一般市民に量子力学に従う物質の面白さ、物質階層の謎、宇宙での物質の進化などについて広報していきたいと考えている。

以上のように本領域研究を進め、物質階層の壁を超える連携をさらに強化し、新奇クラスターを鍵として階層を繋ぐという革新的研究を推進し、新たな研究領域の創成を実現させる。

## 11 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(東京大学理学系研究科教授、兼理化学研究所仁科加速器科学研究センター長)、平野琢也氏(学習院大学理学部物理学教授)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いる研究者で、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。3人とも本領域発足当初から総括班評価者に参加してもらっており、総括班会議、領域研究会への参加などを通じて助言をいただいていた。

### 本領域に対する評価コメント

#### 初田哲男氏

本研究領域の目標は、クォーク・ハドロン・原子核・原子・分子の各々の階層境界にあらわれる「セミ階層」に焦点をあて、物質の階層構造の背後にある普遍的論理を探ることである。このような切り口は従来になく、学術的意義は高い。実際、無限系の場合には、相転移や臨界現象の概念が一定の普遍性をもって異なるシステムに適用可能であるが、有限量子系をも包含した普遍性の追究は物理学における新しい方向性と言える。「セミ階層」を特徴づける実体として、フェッシュバハ分子、リユードベリ原子、ダイ中性子、ダイクォークなどの研究が各分野で進みつつあるが、これらの点をつないで線や面にしていくことが領域の目標達成の肝となる。本研究領域でキーワードとしてあげられている「力」と「自由度」は対象とする階層ごとの違い特徴づける指標、「閾値則」と「分離度」は階層によらない普遍性の特徴づける指標であるが、これらに定量性を持たせるためには計画研究班間の密接な情報交換が重要である。

本研究領域の総括班の活動では、領域代表者が上記観点を強く意識してリーダーシップを発揮し、「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」の3つの分野連携活動が行われており、高く評価できる。特に前二者は、本研究領域外の研究者コミュニティにもその活発な活動が知られている。これらは、関連分野の若手育成にも貢献が大きいので、COVID-19後は対面とオンラインを併用しながら定期開催していくことを期待する。「検出器ワークショップ」については、本中間評価報告書にも述べられているように、検出技術やデータ解析法の共有を、タスクフォースを核として積極的に進めることが望ましい。「選択と集中」や「イノベーション」が声高に叫ばれる昨今、本研究領域のように自然界の普遍性をさぐる基礎研究こそが人類の知の地平を拓けるとともに、長期的にはさまざまな予期せぬ応用を産む源泉であるという意識を社会に浸透させる活動が重要である。この意味で、新たなタスクフォースを核としたオンライン講演会の今後の定期開催にも期待する。

本研究領域の最初の3年間における各研究計画班がもたらした成果は、いずれも高く評価できる。そこには、ALICE実験高度化に向けての着実な進展、 $K_{pp}$ 原子核の発見、 $\Sigma^+p$ 散乱実験の成功、中性子過剰限界の決定、中性子ハロー核におけるダイ中性子の証拠、偏極標的を用いた3体核力研究、巨大な質量比を持つ極低温原子混合系の生成、冷却原子系における体積粘性率の測定技術確立、QCDや多体手法による第一原理計算の進展、などが含まれる。また、計画研究と相補的な意味をもつ公募研究18件は、いずれも野心的な研究となっている。なかでも、機械学習手法によるハイパー核の効率的探索の研究は大きな将来性を持っている。

## 櫻井博儀氏

本研究は物質階層をつなぐ「量子クラスター」をキーワードとして、多くの分野を糾合した、総合的かつ先進的な世界初の挑戦を実施している。個々の計画班および公募研究の研究は、一部、新型コロナの感染拡大の影響を受けてやや遅れているものがあるものの、概ね順調に進んでいると判断される。研究領域全体としては、各階層の「クラスター」を共通のパラメーターで表現し、各階層にフィードバックする段階に期間途中で移行することが望まれる。統括班は理論中心のワークショップを主催し、「クラスター」の共通概念を整理する機会を設けてはどうかと考える。また、「クラスター」現象の何をどう観測するかという観点で、理論と実験とのコミュニケーションもより一層促進することが重要であろう。非常にチャレンジングな課題であるからこそ、研究会などの開催も領域内で公募し、若手人材に研究会を主催させるなど、若手人材育成の方策も取り入れてはどうかと考える。

## 平野琢也氏

本新学術領域研究は、クォークからハドロン層、原子核層、原子分子層の実験研究を行う6つの計画班、階層をつなぐ理論班、および公募班から構成される組織により、階層構造の普遍的な理解を目指しており、研究領域を通じた異分野の研究者の連携により革新的・創造的な学術研究の発展が期待される、新学術領域研究の趣旨に沿った優れた研究領域である。各計画研究間の交流を深める必要があるという審査結果の所見に対応するため、「階層を横断する会」等の活動が活発に行われており、領域研究会においても、活発な質疑による交流があり、着実に交流が進化していると判断できる。総括班活動は、領域代表の中村教授の適切なリーダーシップのもとで、透明性の高い建設的な議論が行われ、領域会議等の運営や研究グループ間の連携が行われている。実験研究を行う計画研究については、研究機関の前半において実験装置の整備等が順調に進んでおり、研究期間内の成果の達成が期待される。理論研究を行う計画研究についても、実験との密接な連携が進められており、優れた成果が得られている。領域研究会において、セミ階層を含む構造を特徴付ける軸について新しい観点から本質的な議論がなされるなど、研究グループ間の連携により、本領域の研究目的に沿った優れた成果が得られている。研究期間後半においても、研究グループ間の連携を進めることにより、新学術領域としての優れた成果が得られることが期待される。懸念点は、領域研究会の発表に新型コロナウイルス感染症に伴う影響がみられることである。海外研究機関の閉鎖や渡航自粛、また、国内においても大学キャンパスへの入構制限により、実験研究の進展に遅延が生じる可能性があり、影響の把握と、予算等について必要に応じた柔軟な対応がなされることが望ましい。