

領域略称名：量子ビーム応用
領域番号：6007

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

「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」

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 東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授・高橋 忠幸

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	18H05457 宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。	平成30年度 ～ 令和4年度	高橋 忠幸	東京大学・国際高等研究所 カブリ数物宇宙研究機構 (Kavli IPMU)・教授	10
A01 計	18H05458 負ミュオンビームによる原子分子物理の精密検証と宇宙物理観測への展開	平成30年度 ～ 令和4年度	東 俊行	理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員	6
A02 計	18H05459 高エネルギー光子ビームで探る原子核内部と中性子星深部	平成30年度 ～ 令和4年度	中村 哲	東北大学・大学院理学研究科・教授	2
B01 計	18H05460 負ミュオンビームを用いた新たな非破壊元素分析法	平成30年度 ～ 令和4年度	二宮 和彦	大阪大学・大学院理学研究科・助教	3
B02 計	18H05461 マッハ衝撃波干渉領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生	平成30年度 ～ 令和4年度	木野 康志	東北大学・大学院理学研究科・准教授	6
B03 計	18H05462 高偏極 RI ビームの生成と核・物質科学研究への応用	平成30年度 ～ 令和4年度	上野 秀樹	理化学研究所・開拓研究本部／仁科加速器科学研究センター・主任研究員	5
C01 計	18H05463 宇宙硬エックス線・ガンマ線検出テクノロジーの異分野への展開	平成30年度 ～ 令和4年度	高橋 忠幸	東京大学・国際高等研究所 カブリ数物宇宙研究機構 (Kavli IPMU)・教授	8
C02 計	18H05464 最先端負ミュオンビーム開発	平成30年度 ～ 令和4年度	三宅 康博	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 (KEK-IMSS)・特別教授	3
		平成30年度 ～ 令和4年度			
		平成30年度 ～ 令和4年度			
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、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]
A01 公	19H05187 先端的宇宙X線検出器で迫る多価重イオンの量子電磁力学	令和元年度 ～ 令和2年度	中村 信行	電気通信大学・コヒーレント光量子科学研究機構 レーザー新世代研究センター・教授	1
A01 公	19H05189 中性粒子計測における超伝導転移端検出器の安定動作に向けた基盤構築	令和元年度 ～ 令和2年度	藤本 龍一	金沢大学・理工研究域 数物科学系・准教授	1
A01 公	19H05195 精密X線検出器が実現する宇宙化学反応研究の新展開	令和元年度 ～ 令和2年度	久間 晋	理化学研究所・開拓研究本部・専任研究員	1
A02 公	19H05181 仮想光子を使った nn 散乱長の精密測定による荷電対称性の破れの研究	令和元年度 ～ 令和2年度	石川 貴嗣	東北大学・電子光物理学研究センター・助教	1
A02 公	19H05182 ラムダ陽子散乱実験実現のためのデータストリーミング型MPPC読み出し回路の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	本多 良太郎	東北大学・高度教養教育・学生支援機構・助教	1
B01 公	19H05183 小惑星探査機はやぶさ2の回収試料のミュオンによる炭素質物質分析法の確立	令和元年度 ～ 令和2年度	中村 智樹	東北大学・大学院理学研究科・教授	1
B01 公	19H05192 強相関電子系における負ミュオン捕獲過程でみる電子多体効果	令和元年度 ～ 令和2年度	髭本 亘	日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹	1
B03 公	19H05191 電池材料研究のための高偏極放射性リチウム及び酸素同位体ビーム開発	令和元年度 ～ 令和2年度	三原 基嗣	大阪大学・理学研究科・助教	1
C01 公	19H05185 多重散乱コンプトンカメラの実現による宇宙MeVガンマ線感度の向上と医療への展開	令和元年度 ～ 令和2年度	小高 裕和	東京大学・大学院理学研究科・助教	1
C01 公	19H05193 医療機器TOF-PETに用いる半導体検出器の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	中村 浩二	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教	1
C01 公	19H05196 高性能SPECTを用いた中枢リンパ系ドレナージの循環動態イメージング法の開発	令和元年度 ～ 令和2年度	水間 広	理化学研究所・生命機能科学研究センター・研究員	1

C01 公	19H05197 超高分解能／多核種同時測定イン ビボイメージングを可能にする分 子プローブの開発	令和元年度 ～ 令和２年度	梅田 泉	国立がん研究センター・先 端医療開発センター・ユニ ット長	1
C02 公	19H05194 ミュオンマイクロビーム生成のた めのフラットトップ高周波加速空 洞の開発	令和元年度 ～ 令和２年度	山崎 高幸	高エネルギー加速器研究機 構・物質構造科学研究所・助 教	1
D01 公	19H05184 惑星量子ビームとミュオン分析の 連携で迫る氷天体物質の合成と蓄 積	令和元年度 ～ 令和２年度	木村 智樹	東北大学・学際科学フロン ティア研究所・助教	1
D01 公	19H05188 フッ化物イオン電池材料のイオン 伝導性の研究	令和元年度 ～ 令和２年度	小林 義男	電気通信大学大学院・情報 理工学研究科・教授	1
D01 公	19H05198 エキゾチック原子法を用いた宇宙 観測およびその応用による新機軸	令和元年度 ～ 令和２年度	福家 英之	宇宙科学研究所・学際科学 研究系・准教授	1
D01 公	19H05199 ミュオン特性X線元素分析イメー ジングによる価数・電子状態の可 視化	令和元年度 ～ 令和２年度	梅垣 いづみ	株式会社豊田中央研究所・ フロンティア研究領域 梅 垣研究グループ・研究員	1
公募研究 計 17 件 (廃止を含む)					

[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。

素粒子実験や宇宙観測など、宇宙への根源的な疑問に答えるために高い科学目標を掲げて実施される研究は、感度と分解能のたゆまぬ追求の結果として、極限性能を持つ先端検出器の研究開発を牽引してきた。そして、物質の究極の姿を探るための素粒子・原子核実験においては、人類の持つ技術の粋を尽くし、最先端の技術を用いた高度な加速器研究が極めて重要な位置を占める。本領域提案は、高強度負ミュオンビームを物質に照射し、生じたミュオン原子からの蛍光「硬 X 線」を、研究代表者が中心となり開発してきたテルル化カドミウム(CdTe)半導体による大面積ガンマ線イメージャでとらえることで、世界ではじめての Li 金属の 3D 非破壊検査が実現した。

宇宙先端検出器とミュオンビームの強烈な出会いと成功は、本領域提案を構成する「エキゾチック」量子ビーム実験を最前線で進める研究者の注目を浴び、宇宙観測のために開発された硬 X 線・ガンマ線イメージャや超伝導 TES(Transition Edge Sensor) 型カロリメータによる X 線領域で数 eV のエネルギー分解能の分光技術などの革新的検出器技術を用いることで、滞っていた様々な研究が一気に進むことが強く認識された。そして、物理学、天文学を背景とする研究者ばかりではなく、化学分析から核融合にいたる多彩な研究者のネットワークを作り、議論を行うことで、「出会い」によってもたらされる互いの研究技法が「紡ぎ(つむぎ)」あわさり、基礎科学研究ばかりではなく、医療、生物、物性、さらに核融合の分野にいたるまで、極めて広範囲にわたる応用プロジェクトが芽吹き、発展するという確信を得た。そこで本研究では、負ミュオンと宇宙観測用先端検出器の二つを技術的な軸とし、分野間連携による新たな研究分野の開拓を目指す。

加速器が現代科学の担い手であり、今後もあり続けるであろうことは言をまたない。ヒッグス粒子の発見をもたらしたエネルギーフロンティアはもとより、我が国の大強度陽子加速器施設(J-PARC)などにみられる輝度フロンティアにおいても、技術進歩が著しい。近年では、中性子、ミュオン、重イオン、さらには光そのものにいたるまで、高輝度ビームが作り出され、多彩な基礎科学を生み出している。ところが、こうした分野の研究は異なるビーム種別ごとに孤立して進められ、他の分野で高度に進んでいる理論研究や技術の進展に気がつくことなく進められているのが現状である。それがために、飛躍の機会を逃しているケースが数多く見られる。このような現状を打破するために、超高強度負ミュオンビームを中心に、高エネルギー光子、偏極を付加した RI ビーム(Radioactive Isotope) という、日本が国際的に極めて優位な位置にある、3つの「エキゾチック」な量子ビームの研究を結びつけることを目指す。一見、異なる舞台の上で研究を行う研究者グループが、高度な知見を持ち寄り、共同でそれぞれの実験を行うことで、革新をもたらす検出器を有機的に連携し、さらに共通となる(少数多体系という)物理原理の相互理解を図る点に特徴がある。これによって、新たな視点や手法による共同研究を行い、それぞれの基礎物理分野の研究を深化させるばかりではなく、核医学から非破壊元素分析にいたるまで応用研究においても、全く新しい展開がもたらされる。

本研究分野は、素粒子・原子核物理、原子分子物理、加速器科学、物質・生命科学、計算科学を包含する新たな学術分野の創成を目指し、原子核から考古物、隕石に広がる物理、化学の本質を明らかにするものである。対象学問分野は広く、原子分子物理学、素粒子・原子核物理学、分析化学、物質科学、宇宙物理学といった基礎科学のフロンティアに加え、核融合研究、核医学研究、さらには、高強度負ミュオンによる隕石や考古試料などの非破壊元素分析や Li 電池中のイオン移動の可視化といった、極めて実用に近い学問分野まで多岐にわたる。

本領域は独自性が高く、国際的にも優位な技術を融合させることで、エキゾチック量子ビームを用いた基礎科学と応用分野における格段の進展を図ろうとするものである。特に、領域提案者自らが創出し実現した革新的な放射線検出器と、世界に例を見ない高強度負ミュオンビームが重要である。一見、これまで接点がなかった学問分野において、最先端量子ビームを用いることにより、様々な現象を多面的な

視点で理解し、本質を解明することが可能となる。化学・物理やその細目分類に捉われない、本質に基づく物理学、宇宙科学、物質生命科学分野、生命科学を創成することができる。

研究代表者 高橋らが、その実現に尽力した「ひとみ(ASTRO-H)」衛星は、世界でも類を見ない高性能検出器が搭載された我が国で過去最大の科学衛星であった。困難を乗り越え、完成させ、軌道に打ち上げ、性能を確認することができたが、その素晴らしい性能を活かした観測が今できないことは痛恨の極みである。1ヶ月にもみたくない観測の結果が2編のNature論文を含む、いくつもの論文になったことからわかるように、「ひとみ」衛星では、世界最高レベルの技術が結実したといえる。この技術を、地上での科学研究や実用に展開することは、我が国として、極めて重要である。

CdTe 検出器が「ひとみ」衛星の硬 X 線撮像検出器、軟ガンマ線検出器として結実したのに加え、高温プラズマ観測の未来を切り開くとされた技術が、東(A01代表)が原子核研究者の岡田(同分担)らと共に本提案に持ち込んだ7 eV (FWHM) 以下というエネルギー分解能を持つ X 線検出器である。この性能を日常的に得ることができれば放射線計測の常識は一変する。「ひとみ」衛星に搭載されたマイクロカロリメータは、大型の冷却システムが必要であったが、岡田らは米国 NIST と協力し、TES (Transition Edge Sensor) を用いて加速器実験用の可搬型センサーシステムを作りあげた。そして、世界ではじめて原子核実験に適用することに成功し、TES センサーを用いて国際競争の最前線にいる。本領域は、こうした宇宙発の世界最高水準の検出器を用いて、加速器実験の常識を一変させるという点で重要である。

負ミュオンを「プローブ」として用いるエキゾチック原子研究、X線蛍光分析をはるかに凌ぐ超高感度の元素分析手段としてのミュオン特性 X 線応用などは、大きく期待されながら、負ミュオンの収量が正ミュオンと比べて1桁程度も小さいため、実用研究は他のミュオン施設においてはほとんど実施されてこなかった。三宅らは、J-PARC の様々なトラブルを乗り越え、ビームラインの研究を続け、2017年、ついに、収量にはまだ課題があるものの、58 keV の低速負ミュオンを引き出せるにいたった。このような強度で、金属標的数百ナノメートル深さに止められるような運動量分布をもった負ミュオンビームは世界に存在しない。我々は、国際的に極めて優位な位置にいる。

日本は、基礎は優れているが、それを応用に転換するのが苦手であり、それが「発想の転換」による新規分野の創出につながらない理由と言われる。狭い分野や環境に閉じこもった研究スタイルがその原因として指摘されることが多い。本領域研究は、過去にないほどの広い分野から、「腕利き」の研究者を集め「融合的研究プラットフォーム」を確立することで、状況を打破しようとするものである。提案者が主導し、めざましい勢いで進んだ、(i)国際的優位性があり、(ii)国内外に例を見ない独創性、新規性を持つ技術を融合させ、エキゾチック量子ビームという舞台の上で、独創的なサイエンスを展開するという点で特徴的であり、新学術領域研究として、今、推進することが重要である。

本研究では、対象とする原子核や原子分子反応などの基礎科学研究、新しいエネルギー生産を可能とするミュオン触媒核融合研究などにおいて、共通する原理を理論的に見いだすことを目指す。同時に、多彩な研究者を、領域にまとめあげ、頭脳循環をはかることで、「新たな価値創出を容易とするプラットフォーム」および、「イノベーション創出に向けた人材、知、資金の好循環システム」が実現する。

大強度負ミュオン源の研究は、ミュオン触媒核融合、材料分析、電池材料等の動的挙動の解明といった「新たな価値創出」につながる。また、既に開発された高輝度正ミュオンと対して用いることにより、夢の加速器と言われつつ、高輝度の負ミュオンビームの発生が不可能であったために実現しなかったミュオンコライダーの開発も可能となる。また、将来的にはミュオンの崩壊を利用することでニュートリノ光源としての応用も可能であろう。

異分野の研究現場の要求は、宇宙用途とは異なる境界条件を持ち、それを追求することで、検出器のさらなる性能向上が促される。手軽、かつ短時間で操作するにはシステム化、小型化、高度な画像認識ソフトウェアの開発などが不可欠であり、新たな開発が技術基盤の強化につながる。技術を、様々な応用分野において利用可能な様に整備することで、加速器実験や天文学ミッションの将来計画の実現につながるばかりではなく、新たな基礎科学分野、応用分野の創出に広く資することが期待される。

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。

審査結果の所見では、

- (1) 本研究領域は、宇宙観測用に開発されたガンマ線イメージング技術を各種ビーム実験、物性、医学など幅広い分野で利用することにより、それぞれの分野で新しい展開を目指すものである。国際的に見て極めて高い優位性のある CdTe 半導体検出器を核として、横断的な研究領域が計画されており、中でもミュオンのサイエンスには未開拓の研究領域が多く、検出器の開発を軸に研究領域の融合を推進する着想は高く評価できる。
- (2) 研究組織は大きく基礎科学、応用実験科学、分野横断技術開発から構成される。ガンマ線イメージャの更なる高度化を実現するとともに、理論と実験を含む、それぞれの計画研究が有機的に連携することにより、原子核物理のみならず、ミュオンによる非破壊元素分析法、新奇量子ビームを用いた物質科学研究などを発展させることを目指す。さらには、がん幹細胞の識別を目指した医学計測技術を確立することも目標としており、各計画研究組織には着実な成果が期待できる。

として、宇宙観測イメージング技術を基礎とした先端検出器技術とミュオンを始めとする量子ビームを組み合わせることで基礎科学、応用実験科学、分野横断技術開発のそれぞれで着実な成果を期待すると、**本研究領域が目指す領域融合研究の方向性を支持**して頂いた。

その一方で、

- (3) しかしながら、一つの統合された領域としての進展を図るためには、開発グループへのフィードバック機構を取り入れるなど総括班の運営形態の中に先端的検出器を通して一見相関のない様々な分野を活性化する方策を組み込むことが必要である。

という**総括班の運営形態の中に、一見相関のない様々な分野を活性化する方策を組み入れる必要がある**、という指摘も頂いた。

このため、「7. 研究組織の連携体制」に示すように総括班は領域代表を責任者として計画研究代表者を加えた計画研究を着実に推進するために研究を主導するコアメンバーから構成されるが、これに留まらず、**若手育成、国際協力、技術開発調整、さらに研究の進捗評価を強化するための担当者を総括班に配置**した。

若手育成は専門分野を横断するスクールを実施するなどして、共通のデータ収集系、測定器技術のエキスパートを育成することを目指している。特に、近年の複雑なデータ収集系の構築に欠かせない FPGA(Field Programmable Gate Array)は、学習用ボードを用いた基礎技術取得や海外における啓蒙活動を進め、さらに広い分野で応用可能なコンパクトなモジュールを開発し、若手育成の目的を越えて、産学連携の試みへと発展しつつある。

特に**技術開発調整担当は A01—C02 の全ての研究班の検出器技術開発の横串**としての調整を行い、計画研究がバラバラにならないような働きを担っている。同様に**理論研究取りまとめ**を B02 代表が担っている。

また、各計画研究グループの研究の進展状況を随時、調査し、必要な助言を与える**内部評価担当が中心となり計画研究のピアレビューを実施**している。このレビュー・相談会は、全ての計画研究の主要実験装置を現地において視察し、研究の進展状況をその目で確認し、フィードバックを掛けるということを目指し以下のような日程で実施した。

ピアレビュー日程 レビューアー 実施場所

	実施日	レビュー対象	レビューアー	場所
1	2019年10月7日	B02	酒井、東 (A01), 中村 (A02)	中部大学
2	2019年10月25日	C02	酒井、中村 (A02)	J-PARC
3	2019年11月15日	A02	酒井、二宮 (B01)	東北大学
4	2019年12月23日	B01	酒井、木野 (B02)	IPMU
5	2019年12月23日	C01	酒井、上野 (B03)	IPMU, 国立がんセンター
6	2020年1月16日	A01	酒井、三宅 (C02)	J-PARC
7	2020年2月13日	B03	酒井、高橋 (C01)	理研

レビューの結果は、領域代表を通じて計画研究班にフィードバックされ、**領域全体の統一性を見ながら、個々の研究が最大限の成果を上げるよう研究戦略を策定**することに役立てられた。

また、J-PARC における大強度ミュオンビームを使う A01,B01,C01,C02 に関してはこれらの**研究領域を横断した一体となる共同実験グループを設立**し、単に J-PARC に既設の装置を使って単発の実験を実施するだけでなく、自ら実験装置の建設、開発を行い、それを用いた共同研究を継続的に実施する事と位置づけられている KEK ミュオン共同利用 **S1 型実験課題**に提案を行った。一部のビームタイムは既に認められ、データ取得が行われて成果が得られつつある。

この S1 型課題の中で本新領域における分野横断の試みが極めて上手く働いた一例を挙げると、A01 代表の東(原子物理)のリードのもと、供給される低速負ミュオンビームの最適化チューニングをミュオン実験に精通した神田(核物理)や上野(核物理/原子物理)が実施した。この際、様々な超伝導カロリメータに詳しい岡田(核物理 A01 から B02 へ領域内頭脳循環)を中心として、「ひとみ」衛星で活躍した X 線衛星検出器に詳しい山田、一戸、野田(X線天文学)に加えて橋本(核物理)、奥村(原子物理)といった専門の違う若手研究者が一致団結してデータ取得を行い、精密 X 線測定に成功した。ここで得られた負ミュオン由来の特性 X 線の解析は、ミュオンのカスケード計算のコードに精通した二宮(B01 代表、核化学)が中心になって実施した。その際、負ミュオンが原子に捕獲された後の脱励起ダイナミクスについて核融合プラズマ内原子過程の専門家である核融合研の加藤(原子物理)の助言を得た。国際共同研究の下、ミュオン原子エネルギーの精密 QED 計算は Indelicato(原子物理理論)が、様々なスクリーニング効果を精密に取り込んだ多価イオン固体相互作用は Tong(原子物理理論)が担当した。さらに負ミュオンが原子核に捕獲された後の反応に関しては、石田(核物理)や木野(B02 代表、原子核・原子分子理論)が協力して解析を進めている。このように、このチームは**今までお互いに顔を合わせる機会がなかった異分野の実験および理論研究者が本領域研究によって新たなチームを結成し、一体となって成果を生み出すという「新学術領域研究」が目指す姿を体現**している。

さらに、ミュオン以外の量子ビームを使う A02, B03 計画研究では、電子ビーム、光子ビーム、RI ビームなどの大規模加速器施設において大規模な実験を展開しており、これらのグループが持つ先端的な実験技術、特にデータ収集系、詳細なシミュレーションを用いた実験デザイン技術を、A01, B01 班などのミュオンを用いた比較的小規模の実験に応用する試みも開始している。さらに、A02 班ではハイパー原子核という本領域の中では最もサイズスケールの小さい量子多体系に関する実験を行っているが、ここで研究している Λ nn 三体系の精密計算には、相互作用が強い相互作用か電磁相互作用かという違いはあるが、まったく同じ少数多体計算技術が適用でき、ミュオン触媒核融合の計算を進めている木野 (B02 代表 原子核・原子分子理論) や肥山 (原子核理論) との共同研究を展開しており、**異分野融合のメリット**が存分に活かされている。

本新学術領域研究は、多種多様な研究グループから構成され、あるグループにとっての常識が他グループに通用しないこともある。研究グループの円滑な情報交換を実現するため総括班会議を頻繁に開催し、**風通しの良い運営**を心がけている (2020 年 6 月時点で 21 回開催)。

上記のように、これまであまりオーバーラップのなかった研究領域から構成される本新学術領域研究ではあるが、総括班が各研究領域のインターフェースとしての役割を果たし、**審査委員からの所見で指摘されたように様々な分野を活性化し関連づけるよう努力しており、成功を収めている。**

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

本領域は基礎科学 A01, A02, 応用実験科学 B01, B02, B03, 分野横断技術 C01, C02 の7つの研究項目が協奏して異分野融合による新たな学術領域の展開を目指している。A, B, Cの研究項目に属する公募研究は、計画研究と相補的にそれぞれの学術領域の深化、横展開を目指し、これらのどの研究項目にも属さない公募研究から構成される D01 研究項目が新たな学術分野へ本領域の持つ技術の展開を目指している。

C01 研究は広く医学研究者を取り込んで様々な展開を示している。さらに、A01, B01, B02, C01, C02 に関連する実験が、当領域全体からの申請として J-PARC におけるミュオン共同利用 S1 型課題として採択された。これにより領域横断的に宇宙物理、原子核物理、原子物理、核化学、ビーム科学、プラズマ物理など様々な分野の研究者が参加する従来にない新しい実験体制により、ミュオンビームを利用する実験が実施された。例えば A01 のミュオン利用原子物理学実験は、分野横断的技術連携が創出した極めて独自性が高くインパクトのある最初の成果となった。また、A02, B03 では独自の研究を展開しつつ、利用する光子ビームや RI ビームを用いた将来の新たな領域横断的研究展開に向けた技術開発を順調に進めている。以下研究項目ごとに進捗状況を記す。

A01 計画研究班 第一の目標は、真空中に孤立したミュオン原子から放出されるミュオン特性 X 線の精密分光を、新たに導入した超伝導 TES カロリメータを用いておこない、重原子のミュオン原子エネルギー準位という、これまで着目されてはいたものの、実現が難しかった系において、量子電磁力学 (QED) 効果を実験的に世界で初めて明らかにすることである。ここで得られる脱励起ダイナミクス実験結果を宇宙物理観測における多価重イオン X 線に関する放射シミュレーションへと展開する。また、本新学術領域において計画されている隕石等の非破壊元素分析に応用することも計画している。さらに CdTe 半導体センサーを併用して広帯域にわたるスペクトル測定をおこなう。中間評価実施時までには、J-PARC 中間子科学施設 (MUSE) D2 ラインにおいて、10 keV までのエネルギー範囲に対応する超伝導カロリメータを実際に導入して精密分光実験を実施し、実験手法を確立することを予定していた。

J-PARCにて、低エネルギー(20MeV/d)の負ミュオンを希薄希ガスネオン中に停止させることによって本研究に必須の孤立ミュオン原子(μ Ne)を生成し、現有の200ピクセル超伝導TESカロリメータを導入して実験を行った。徹底的な雑音低減対策を施し、加えて、エネルギー校正用のX線発生装置を導入して複数の較正用金属から得られる特性X線をミュオン特性X線測定時に同時に観測することによって、実験データ取得中の検出器出力ドリフトの監視を行った。その結果、超伝導TESカロリメータを分解能(半値幅)7 eV以下で動作させることによって、 μ Neからの測定対象とする $5g \rightarrow 4f$ 遷移に伴うミュオン特性X線の絶対エネルギーを、6298.8 eV(統計誤差0.04 eV、系統誤差 0.26 eV)という高精度で測定した。これは、重原子のミュオン特性X線の絶対エネルギーをおよそ40 ppmの精度で初めて決定し、その中に含まれる2-5 eVのQED効果をおよそ10%の誤差内で検証したことを意味する、また同時に行った理論研究者側の最新計算結果と、誤差(1 σ)内で今回の実験結果が一致した。このように、中間評価時までの目標は十二分に達成された。本研究は領域横断的に実施された最初の大きな成果である。

A02 計画研究班 米国 JLab、ドイツ MAMI、東北大 ELPH の三箇所の電子線加速器施設においてそれぞれ特長のあるストレンジネス、ハイパー核実験プログラムを推進している。得られた実験結果を、本領域を横断する理論班と協力し詳細な解析を行うことで、バリオン間相互作用の統一的理解を目指している。これに向け、従来の中間子ビームを用いたハイパー核反応分光に比べ、圧倒的に改善した電子ビームによる sub-MeV のエネルギー分解能を達成し、これまで不可能であった精度でバリオン間相互作用を理解し、「ハイペロンパズル」を解決することが具体的目標である。各加速器施設における中間評価時までの目標と進捗状況は次の通りである。

- 米国 JLab: ${}^3_{\Lambda}n$ ハイパー核 ($nn\Lambda$; 原子番号0のラムダハイパー核) 探索実験を実施しデータ解析を進めること、及び ΛNN 三体斥力の解明に向けた世界初となる中重ハイパー核のアイソスピン依存性の精密測定に必要となるスペクトロメータ系の大型偏向電磁石の設計・製作を行うことが目標であり、両者とも達成された。
- MAMI: 電磁生成したハイパー核等から生じる π^- 中間子を精密測定することで、ハイパー核等の基

底状態の質量を数 10 keV の高精度で決定可能であることが当該グループにより既に原理実証されている。この技術を ${}^3\text{H}$ （三重水素 Λ ハイパー核）の研究に適用すべく、まずは中間評価までに、加速器から供給される電子ビームのエネルギーを従来にない精度で絶対測定する開発実験が計画された。実験の結果、**アンジュレータを用いて電子ビームから放出される放射光の干渉を用いて電子エネルギーを 10^{-5} の精度で決定する技術開発に成功し、結果を誌上発表した。**

- ELPH: $\gamma\text{d} \rightarrow \text{K}^+\Lambda\text{n}$ 反応の Λn の終状態相互作用が K^+ スペクトラムに与える影響を測定することによりバリオン間相互作用で最も基本的な Λn 間相互作用を調べる実験を進めている。このために必要となる高時間分解検出器のプロトタイプの製作と性能評価を行うこととしていた。開発研究は順調に進んでいる。

B01 計画研究班 これまで当該グループが開発してきた負ミュオンによる元素分析法を発展させ、宇宙観測で近年急速に開発が進んでいる CdTe イメージング分析装置を応用展開することで、非破壊で物質内部の元素分布を三次元的に可視化することをめざす。さらに従来進めてきた Ge 半導体検出器に加えて、**超伝導 TES カロリメータ**を用いて、従来をはるかに凌ぐ精度での試料中の元素の微量分析をはかる。これによって、物質内の軽元素の分布可視化や同位体の情報取得など、これまでにない新しい分析法を開発し実践することである。これに向け検出器・測定システムを開発するとともに、J-PARC MUSE において先端的な非破壊元素分析研究を展開することを目指している。

本研究課題では、中間評価までに予定していた通りの研究進展が得られている。元素分析実験については、**C01、C02、さらに A02 班との領域横断的共同研究により「はやぶさ2」の持ち帰る微量サンプルの試験を想定し、Ge 半導体検出器による元素分析実験のシミュレーション実験を実施した。**また、高エネルギー物理実験で開発された粒子飛跡シミュレーション Geant4 や、Si 検出器やシンチレータなどを用いた実測を通じて、バックグラウンド低減化に向けた研究を実施した。さらに、**C01 班と共同で、CdTe 両面ストリップ検出器とタングステンピンホールコロリメータによる負ミュオントモグラフィの実験を J-PARC で行い、データを取得した。加えて、複数のセンサーで取り囲むための小型 CdTe イメージング検出器および小型冷却ハウジングの試作機を開発し、性能評価を行った。**

B02 計画研究班 将来のエネルギー源として期待されつつも、得られる実効的なエネルギーの不足が問題となっているミュオン触媒核融合 (μCF) にブレークスルーを起こすため、B02 班では、ミュオン原子衝突中（飛行中）に $\text{d}\mu + \text{t} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + \mu + 17.6 \text{ MeV}$ を起こす従来とは異なる新たな反応過程を含む「飛行中ミュオン触媒核融合 (In Flight μCF ; IF μCF) サイクル」を提案し、原理実証を目指している。IF μCF に関わるミュオン原子やミュオン分子過程の素過程を理論と実験で明らかにし、さらに、反応場としてのマッハ衝撃波干渉領域の開発と設計を行い、IF μCF から得られる中性子やエネルギーの利用について、工学的見地からも検討を行う。中間評価時までの研究計画（3 項目）と進捗状況は下記の通りである。

- i) ミュオン原子分子過程中の原子核反応 $\text{t}\mu + \text{d} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} + \mu + 17.6 \text{ MeV}$ を四体問題として計算できる計算法の開発を行った。これを用いた計算から、**従来の μCF サイクルと IF μCF サイクルを組み合わせることにより、核融合後に放出される ${}^4\text{He}$ 原子核による加熱を利用しない方法を理論的に見出した。**
- ii) ラバールノズルと斜め衝撃波発生器の組合せで生じる空気力学的な力によってマッハ衝撃波干渉領域を中空に生成する。炉壁にかかる圧力が 1 気圧程度で済むのが最大の特長である。現在、ラバールノズルと衝撃波発生器を開発し、干渉領域について形状や密度などの基礎データを順調に取得している。
- iii) 核融合反応後 (${}^4\text{He} + \text{n} + \mu + 17.6 \text{ MeV}$)、ミュオンは束縛を外れ次のサイクルに入る再生ミュオンが、一部は ${}^4\text{He}$ 原子核に捕まり X 線を放出する。**C02 班と共同で、 μCF 素過程を直接観測するための実験装置を開発し、再生ミュオンの検出に世界で初めて成功した。**

B03 計画研究班 RI ビームに「核スピン高偏極」という新たな価値を付加した新奇量子ビームを実現し、物質科学分野で新たな研究を開拓する。原子線共鳴法を RI ビームに応用することで元素依存性のない高偏極 RI ビームの生成を実現し、 μSR 法（ミュオンスピン回転/緩和/共鳴法）と相補的で同水準の利用価値を生む β 線検出型超高感度 NMR 法による物質科学研究へと踏み出す。本計画研究の最終目的は、RI 原子線共鳴装置を開発し元素に依らない高核スピン偏極 RI を実現すること、及び β -NMR 法に基づく新たな物質科学研究を開拓すると共に領域横断的研究を策定・実施することである。

中間評価までの主な計画の流れの一つは、核プローブ研究チームが ${}^{21}\text{O}$ を用いた NMR に必要となる核電磁モーメントの測定に成功すること、及び物質科学研究チームが CuO 単結晶の大型化に成功すること、そしてそれらの結果を受けて、両チーム共同で、既存の核反応を利用する（低）偏極 ${}^{21}\text{O}$ ビーム生成法を用い β -NMR 物性実験を開始することである。それらに関しては ${}^{21}\text{O}$ の核磁気及び核電気四重極モーメントの両者が測定され、**前年度迄数 10 μm サイズであった CuO 単結晶が mm レベルまで大型化**できるようになったなど、予定通り目標が達成されている。並行して RI 原子線共鳴装置の開発を行っており、装置の中でも最も重要な機能を担う RI イオントラップ・中性化系の開発が、中間評価までのもう一つの主

たる開発要素である。目的イオンの協同冷却に用いる **RI イオン冷却用レーザーの開発、RI イオントラップシステムのプロトタイプの構築はほぼ完了し、計画は順調に進んでいる。**

C01 計画研究班 宇宙観測研究から生まれた X 線・ガンマ線センサー技術、特に本研究班が世界に先駆けて開発した大面積 CdTe 半導体イメージャを用い、本領域を進めるにあたって必要な横断的な検出器開発を行うとともに、様々な応用分野に展開することを目的としている。領域設定期間内に、宇宙観測から生まれた硬 X 線・ガンマ線イメージング技術を発展、適用し、核医学、特にがん研究への加速的応用をはかる。中間評価実施までに、医学研究者の持つ課題の整理と我々が行うべき医学研究に向けた戦略をたて、医学や薬学の研究者と連携して小動物や非密封線源をもちいた生物実験を行う体制を整えることが目標である。

本研究グループが開発をつづけてきたエネルギー分解能の高いイメージングが可能な CdTe 半導体センサーによる小動物 SPECT 装置を用いた *in vivo* 実験やがん細胞を移植した担がんマウスを用いた実験が行われた。その結果、マウスのリンパ節、および甲状腺の複数核種同時イメージング実験では、**マウス咽頭部の 1-2 mm 程度の大きさの微細組織への異なる RI 化合物（分子プローブ）の集積を、高い空間分解能で、かつ 3 核種同時に可視化することに成功している。**また、シャーレ内の *in vitro* で微小がん幹細胞塊（250 ミクロン程度）を識別することにも成功するなど、既に世界レベルでも最先端の成果が得られつつある。並行し、**領域横断的な利用を可能とするより高効率の厚型 CdTe センサーの開発にも成功し、**B01 計画研究などへの利用展開を進めているほか、医学イメージングの技術を応用し、B01 班と共同で負ミュオンを用いた物質内部の軽元素分布の 3 次元可視化に向けた実験をトモグラフィの手法で実施した。さらに将来の X 線、ガンマ線宇宙観測にむけた次世代検出器の検討が進んでいる。中間評価時までの目標は十二分に達成されている。

C02 計画研究班 数 10 ナノメートル径まで収束可能な超低速負ミュオンビームを開発し、収束負ミュオンビームの走査（偏向器による XY 走査、およびエネルギー走査による打ち込み深さの走査）により、物質表面の元素分布・同位体分布や化学結合分布を、非破壊、極めて高い感度、3 次元、かつ数 10 ナノメートルの分解能（深さ方向は数ナノメートル分解能）で可視化する革新的な分析顕微鏡となる走査負ミュオン顕微鏡の実現を目的としている。ここまで計画通り、i) 負ミュオン高度化及び ii) 超低速負ミュオンビーム開発の 2 段階で研究を進めてきた。

項目 i) では本領域研究の基盤となる J-PARC MUSE の負ミュオンビームラインの高度化、運動量のオンラインモニターと自動調整プログラムによる収束強化を計画した。これまでにビームコリメータやビームダクトを最適化することによって空气中測定が可能となり、ミュオンビームの運動量狭幅化のためのビームモニターシステムが高度化されるなど、**QED 検証実験の A01 班、3D 非破壊元素分析の B01 班、および高分解能ガンマ線検出器開発の C01 班の環境整備が進んでいる。**開発 i) で得られる負ミュオンビームは、大強度ではあるもののそのままではさらなる収束が困難である。そこで、ii) ではミュオン触媒核融合反応をビームの冷却手段として利用し、ナノスケール径まで収束可能な超低速負ミュオンビームの開発を進めている。2019 年度、極低温の固体重水素ターゲットに負ミュオンを照射するミュオン触媒核融合実験を実施し、中性子等の観測により**実際にミュオン触媒核融合反応が生じていることを確認し、さらに超低速化されたミュオンの検出にも成功した。**以上、項目 i)、ii) 共に開発・整備計画は順調に進んでいる。

(2) 本研究領域により得られた成果

A01 計画研究 μNe からの $5g \rightarrow 4f$ 遷移に伴うミュオン特性 X 線の絶対エネルギーを、6298.8 eV（統計誤差 0.04 eV、系統誤差 0.26 eV）という高精度で測定し、強電場下の bound-state QED 測定を目標として長年取り組まれてきた水素様ウランイオン (U^{91+}) の $2p-1s$ 遷移エネルギー決定と同等のレベルにまで到達した。過去にはミュオン原子を使った強電場下の原子物理検証を目標とした研究は皆無であり本測定の成功の意義は極めて大きい。加えて、ミュオン原子における電子特性 K-X 線の分布測定も、固体標的に対して数 keV の X 線脱出深さ以内にミュオンを停めることのできる低速負ミュオンビームと、高分解能超伝導 TES カロリメータの威力が十二分に発揮された結果である。関連する脱励起ダイナミクスは、まさに原子物理と原子核物理の境界分野であり、孤立原子と対照的に多価イオンが固体中に入射したときの電子移動ダイナミクスと密接に関連しており、様々な分野を巻き込む大きな成果といえる。

公募研究 宇宙観測のために開発された先端的 X 線検出器、Si/CdTe コンプトンカメラと超伝導 TES カロリメータによりその限界を打破し、電子間相互作用の量子電磁力学を記述するブライト相互作用理論をこれまでにない領域まで迫り検証することが目的である。これまでに C01 班と共同で Si/CdTe コンプトンカメラを用いてリチウム様ビスマス多価イオンの二電子再結合過程により放出される X 線直線偏光度の高精度直接測定に成功した。過去に他の手法を用いて測定された結果と比較して、統計的不確かさ

を大幅に改善することに成功し、これまでに調べられたことのない相対論的效果を取り込んだブライト相互作用のゼロ周波数近似理論の適用限界に迫ることが可能となった。

A02 計画研究 MAMI において、加速器から供給される電子ビームのエネルギーを従来にない精度で絶対測定する必要があり、アンジュレータを用いて電子ビームから放出される放射光の干渉を用いて電子エネルギーを精密に決定する技術を開発し誌上発表した (P. Klag *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **900**, 47–156 (2018))。

公募研究 A02-1 班は、チャンネル結合のメソン・バリオン散乱を記述する理論モデルを使って、実光子の $\gamma d \rightarrow \pi^+ nn$ 反応における 0° に放出された π^+ メソンに対する微分断面積 $d^2/d\Omega\pi/dM_{nn}$ ($\Omega\pi$ は放出される π^+ メソンの立体角、 M_{nn} は nn 不変質量を表す) から nn 散乱長と有効距離が決定できることを示した。この結果は Phys. Rev. C 誌に投稿中である (arXiv:2003.02497)。A02-2 班は、最大 1 T 程度の強磁場中で動作する MPPC 読み出し回路の開発を目的としている。強磁場中で回路を安定に動作させるために、電源 IC の磁場中での変換効率の測定などの評価実験を行った。さらに、使用予定の ASIC に関し、開発元の技術者と議論を重ね、十分な検討を経て、MPPC 読み出しに向けた試験基板の設計、製造を行った。

B01 計画研究 2020 年 3 月に J-PARC にて、B01 班が中心となり、A01、C01、C02 班と共同で Ge 半導体検出器や CdTe イメージャを用いて隕石試料への負ミュオン照射実験を行い、隕石の非破壊元素分析を行うことができた。本実験は、B01-1 公募研究 (代表 中村智樹) と共に検討が行われている「はやぶさ 2」の初期資料分析の実施に向けた実験である。2020 年 12 月に地球に帰還予定の「はやぶさ 2」が持ち帰る小惑星リュウグウのリターンサンプルは最大でも 0.5 cm 程度の大きさであると考えられている。これまでのミュオンによる元素分析法では、10 cm オーダーの大きな試料への適用実験しか行われていなかったが、測定システムの最適化により、その適用範囲を 1 cm 以下の試料について適用可能であることを示すことができた。さらに現時点でリュウグウと最も近い組成と考えられている CM 型炭素質コンドライト (CM: 化学組成や酸素同位体組成に基づく分類の一つ) の分析を行い、炭素量が 3% であることを非破壊で示した。これは破壊分析による結果と完全に一致しており、リターンサンプル分析のフィジビリティを示すことができた。また A01 班で開発されたビームダクトやチェンバーを用いた低バックグラウンド実験の検討や超伝導 TES カロリメータによる測定実験の感度検討などを共同で行うことができた。医学イメージングのために C01 班で開発された装置を用い、直径 1 cm 程度のポリエチレンの球を複数用いて作ったファントムを回転させながら負ミュオンビームで照射し、3 次元可視化のためのトモグラフィ解析を行うためのデータを取得することができた。

公募研究 B01-1 班では、2020 年 3 月に J-PARC において Ge 検出器を用いてリュウグウ回収サンプルに近い物質である炭素質隕石に対し、負ミュオンを照射し元素分析を行った。結果、炭素と酸素由来の X 線を有意に検出することができた。また、元素濃度の定量化を行い、得られた定量値が報告されている炭素質隕石の元素濃度の範囲に入ることを確認した。模擬試料での軽元素検出に成功した点で実際のリュウグウ回収試料の分析への最初の目的を達成した。

B02 計画研究 理論研究では、クーロン力などの長距離力を含む四体系を精密に計算できるガウス関数展開法の定式化と計算プログラムを開発し、これまで摂動計算でしか考慮できなかったミュオン原子分子の周りをまわる電子の影響を直接計算できるようになった。これを用いた理論研究によって、高密度水素ガスの電離しきい値より低い温度 (< 0.1 eV) で従来の μCF と $\text{IF}\mu\text{CF}$ サイクルを組み合わせることで、核融合後に放出される ^4He 原子核による加熱を利用しない $\text{D}\mu\text{CF}$ (Dual μCF) サイクルが可能であることを見出した。現在、ラバールノズルと衝撃波発生器を開発し、干渉領域について形状や密度などの基礎データを順調に取得している。C02 班と合同で、 μCF 素過程を直接観測するための実験装置を開発し、再生ミュオンの検出に世界で初めて成功した。

B03 計画研究 ^{21}O の核磁気及び核電気四重極モーメントの両者が測定され (1 名が博士号取得、もう 1 名も博士号取得に向けデータ解析中)、前年度まで数 10 μm サイズであった CuO 単結晶が mm レベルまで大型化できるようになったなど、予定通り目標が達成されている。なお、核プローブ研究の関連研究として日仏を中心とする日欧共同研究により理研 RIBF 施設で実施された、超中性子過剰核 ^{75}Cu [Nat. Phys. **15**, 321 (2019)] 及び ^{99}Zr [Phys. Rev. Lett. **124**, 112501 (2020)] の核磁気モーメント測定は、それぞれ理研から (前者は東大と共同で) プレスリリースされた。

公募研究 QST 放医研 HIMAC 加速器施設にて、高エネルギー ^{18}O ビームの中性子ピックアップ反応による、スピン偏極 ^{19}O ビーム生成試験を行った。その結果、高偏極 ($P \sim 10\%$) かつ高強度な ^{19}O ビームの生成に成功した。この手法を用いて、燃料電池の電解質材料であり、高酸素イオン伝導体として知られるイットリア安定化ジルコニア (YSZ) 中 ^{19}O の β -NMR 観測を行い、室温におけるスピン-格子緩和時

間 (T_1) のデータが得られた。

C01 計画研究 マウスのリンパ節、および甲状腺の複数核種同時イメージング実験を実施した。3つの分子プローブをそれぞれ異なる核種で標識し、放射される異なるエネルギーのガンマ線を識別してカラー画像を作成した。その結果、マウス咽頭部の 1-2 mm 程度の大きさの微細組織への異なる RI 化合物 (分子プローブ) の集積を、高い空間分解能で、かつ 3 核種同時に可視化することに成功した。この技術は、ひとつの組織の中 (腫瘍、脳のみならず様々な組織) で、異なる生理機能を可視化できる可能性につながるため、極めて重要な成果である。さらに、「ヨウ素イオンをとりこむトランスポータ(NIS)を過剰発現させたがん細胞」を特殊な方法で培養、数個~数千個の細胞からなる細胞塊 (スフェロイド) を形成した。このスフェロイドは、がん幹細胞塊とみなすことができる。これを I-125 でラベリングした上で、I-125 から放射されるガンマ線のイメージングを実施し、シャーレ内の *in vitro* でがん幹細胞塊 (250 μm 程度) を識別することに成功した。生体内での薬物動態を研究するために、広い領域を一度にイメージングを行うことが必要である。そのための並行コリメータとして、東レプレシジョンとの共同研究を行い、高効率化を達成可能なタングステン製の 3D printing によるコリメータの開発に成功した。日本アイソトープ協会と共同で、数 100 μm の幅のマイクロ流路に樹脂に溶かし込んだ放射性同位元素を封じ切る技術を開発した。開発したものは「密封線源」として取り扱い可能なため、これまでは特別な施設で非密封線源を用いて行われていたイメージング性能評価実験を普通の研究室で行うことができる。また B01 実験に用いるための高い検出効率を有する 2 mm 厚の CdTe 両面ストリップ検出器の新規開発に成功した。

公募研究 C01-3 班では、中枢性リンパ管の循環イメージングの実現のために、本研究では最初に動物基礎研究としてマウスの中枢性リンパ管のイメージングに取り組んでいる。標識トレーサーの開発では、高分子化合物であるデンドリマーに DTPA 錯体を形成し、SPECT 撮影用のガンマ線放出核種である In-111 を標識した ([In-111]DTPA-デンドリマー) を、マウス髄腔内投与用に遠心濃縮して、放射活性濃度を 1 MBq/1 μL まで高濃度化することに成功し、高比放射能 (100 GBq/ μmol 以上)・高放射化学純度 (95% 以上) を達成した。また、従来の投与カテーテルよりも高精密な SPECT 撮影用に非金属製の髄腔内投与針を新たに作製し、[In-111]DTPA-デンドリマー投与によるマウス髄腔内撮像に世界で初めて成功した。C01-4 班では、計画研究 C01 班で開発中の宇宙観測研究から生まれた新しいイメージング装置の高空間分解能特性を最大限に活かすことの出来る高放射能濃度分子プローブ調製に取り組んでいる。薬物送達システムのキャリアであるリポソームに高濃度に放射性核種を封入することを検討し、In-111 および Tc-99m を従来の約 10 倍の濃度で封入することに成功した。

C02 計画研究 偏向電磁石によって運動量方向に分散した負ミュオンビームを下流に設置した 2 つのスリットを閉めることで分散ビームを空間的に切り出し、17-21 MeV/c について運動量分布の半値幅で 24-35 %であったものを 7 %程度に狭めることに成功した。低運動量ビームの大強度化に関しては、高検出感度のマイクロチャンネルプレート (MCP) をモニターとして採用し 2.6 MeV/c (32 keV) の低運動量ミュオンビームの引き出しに成功した。また、超低速負ミュオンビーム生成についても以下の成果が得られている。2 K まで冷却可能な極低温固体水素標的実験装置を設置し、厚さ 1 mm の固体水素に数 μm の重水素を蒸着したミュオン触媒核融合ターゲットに負ミュオンビームを照射、固体水素中でミュオンを止め水素とミュオンの束縛状態 $p\mu$ を生成し、続いて固体水素中に 0.1%ドープした重水素との同位体置換により $d\mu$ を生成した後、ラムザウア・タウンゼント効果により重水素層までこれを拡散輸送させ、ミュオン触媒核融合を引き起こさせる実験を実施した。標的からの中性子放出の検出により核融合反応を確認し、さらに新規に開発した同軸型輸送ラインにより超低速化されたミュオンを引き出し、チタンターゲットに照射してミュオン誘起のチタン特性 X 線が出力されることも確認し、実際に超低速化されたミュオンが放出されることが確認された。

D01 公募研究 D01-2 班では、 ^{57}Mn イオンを注入するインビーム・メスバウアー分光実験は放医研 HIMAC で行ない、室温より高い温度で測定した CaF_2 単結晶中の ^{57}Fe インビーム・メスバウアースペクトルを取得した。スペクトルから得られた異性体シフトや四極子分裂などのメスバウアーパラメータと DFT 計算を照らし合わせ、 ^{57}Fe の酸化状態とその周囲の配位環境の考察が進められている。F の拡散挙動は、高温領域におけるマクロスコピックな実験データをもとに考察されてきたが、本研究からは原子スケールでの挙動に関する情報が得られる。また、D01-3 班では、エキゾチック原子法の中核を担うリチウムドリフト型シリコン Si(Li) 検出器の開発と高性能化を目指して Si(Li) 検出器の評価モデルを開発し、広い温度範囲での特性評価などの各種試験を通じて、Si(Li) 検出器の高性能化に向けた基盤的データを取得した。

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。

論文等は特に断りがない限り全て査読あり。

【A01】計画研究

（雑誌）

- [1] S. Okada, T. Azuma, D. A. Bennett, P. Caradonna, W. B. Doriese, M. S. Durkin, J. W. Fowler, J. D. Gard, T. Hashimoto, R. Hayakawa, G. C. Hilton, Y. Ichinohe, P. Indelicato, T. Isobe, S. Kanda, M. Katsuragawa, N. Kawamura, Y. Kino, Y. Miyake, K. M. Morgan, K. Ninomiya, H. Noda, G. C. O’Neil, T. Okumura, C. D. Reintsema, D. R. Schmidt, K. Shimomura, P. Strasser, D. S. Swetz, T. Takahashi, S. Takeda, S. Takeshita, H. Tatsuno, Y. Ueno, J. N. Ullom, S. Watanabe, S. Yamada, “X-ray spectroscopy of muonic atoms isolated in vacuum with transition edge sensors”, J. of Low Temp. Phys., <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02476-5> (A01,B01,B02,C01,C02 研究項目横断成果)
- [2] S. Yamada, H. Tatsuno, O. Okada and T. Hashimoto, “Coevolution of the Technology on Transition-Edge-Sensor Spectrometer and Its Application to Fundamental Science”, J. Low Temp. Phys. (2020). <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02441-2>
- [3] R. Hayakawa, S. Yamada (2nd/18), S. Okada (13th/18), Y. Ichinohe (15th/18), *et al.*, “Waveform Analysis of a 240-Pixel TES Array for X-Rays and Charged Particles Using a Function of Triggering Neighboring Pixels”, J. Low Temp. Phys. (2020). <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02449-8>
- [4] C. Curceanu, S. Okada (6th/23) *et al.*, “The modern era of light kaonic atom experiments”, Rev. Mod. Phys. **91**, 025006 (2019).

（学会発表）

- [1] 東俊行(招待), 「TES 超伝導 X 線検出器が切り拓くミュオンビーム元素分析の展望」, 第2回 文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探る -加速器が紡ぐ文理融合の地平-, 大阪府大阪市 (大阪大学), Dec. 26, 2019 年 12 月 26 日.
- [2] S. Okada (invited), “Muonic Atom Experiment with Microcalorimeter at J-PARC”, 16th SPARC (Stored Particles Atomic Research Collaboration) Topical Workshop, Jena, Germany, Sep. 9-13, 2019.
- [3] S. Okada, “X-ray spectroscopy of muonic atoms isolated in vacuum with transition edge sensors”, 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD18), Milano, Italy, Jul. 22-27, 2019.
- [4] 岡田信二(招待), 「Toward new frontiers : Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beams」, 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2019, 三重県伊賀市, 2019 年 6 月 12-14 日.
- [5] T. Azuma (invited), “Superconducting TES calorimeter for atomic and molecular physics”, International Workshop on Atomic and Molecular Collisions, Udaipur, India, September 30–October 3, 2018.
- [6] S. Okada and T. Azuma, “Toward Experiments on Highly-charged Muonic Atom/ion Formation and Muon Transfer Process at J-PARC, 19th International Conference Physics of Highly Charged Ions (HCI2018), Lisbon, Portugal, Sep. 3-7, 2018.

（主催シンポジウム）

- [1] J-PARC 負ミュオン実験のための基礎理論および元素分析への応用に関する研究会, 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」KEK@J-PARC 東海キャンパス 2019 年 4 月 18 日.

（アウトリーチ活動）

- [1] T. Azuma, “Precise spectroscopy of atom/molecules and Astrophysics”, International school of Strangeness Nuclear Physics (SNP) School 2019, 宮城県仙台市 (東北大学青葉山キャンパス), 2019 年 9 月 5 日.
- [2] 東俊行, 第 26 回 原子衝突セミナー, 講師, 理化学研究所理研和光キャンパス 2019 年 3 月 28 - 29 日.

【A02】計画研究

（雑誌）

- [1] A. Margaryan, R. Ajvazyan, N. Grigoryan, V. Kakoyan, V. Khachatryan, H. Vardanyan, S. Zhamkochyan, P. Achenbach, J. Pochodzalla, S.N. Nakamura, S. Nagao, Y. Toyama, J.R.M. Annand, K. Livingston, R. Montgomery, “Decay pion spectroscopy: A new approach”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **935** 40-50 (2019) 8 .
- [2] T. Gogami *et al.*, “Experimental techniques and performance of Lambda-hypernuclear spectroscopy with the (e, e’K⁺) reaction,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **900**, 69–83 (2018).
- [3] P. Klag, P. Achenbach, M. Biroth, T. Gogami, P. Herrmann, M. Kaneta, Y. Konishi, W. Lauth, S. Nagao, S.N. Nakamura, J. Pochodzalla, J. Roser, Y. Toyama, “Novel optical interferometry of synchrotron radiation for absolute electron beam energy measurements,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **910**, 147–156 (2018).

- [4] M. Kaneta, Y. Fujii, S.N. Nakamura, et al., “Neutral kaon spectrometer 2,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 886, 88–103 (2018).
- [5] X. Qiu, S. Nagao, S.N. Nakamura, et al. (HKS (JLab E02-017) Collaboration), “Direct measurements of the lifetime of medium-heavy hypernuclei,” Nucl. Phys. A 973, 116–148 (2018).

(学会発表)

- [1] S. Nagao, “Overview of lifetime measurements on hyper-hydrogens at ELPH Tohoku”, Workshop on Electro- and Photoproduction of Hypernuclei 2020, Prague, Czech Republic, February 16 2020.
- [2] T. Gogami, “What we measured and will investigate for the ΛN interaction study with electron beams at JLab”, Electro- and Photoproduction of Hypernuclei 2020, Prague, Czech Republic, February 15, 2020.
- [3] S. Nagao, “Precision Spectroscopy of Lambda Hypernuclei with Electro-photo production”, 3rd EMMI Workshop Wrocław, Poland, December 5 2019.
- [4] K. Uehara, “Development of beam line detectors for the lifetime measurement of Λ hypernuclei at ELPH”, International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2019), Tohoku University, sendai, Japan, September 5-8, 2019., Incentive Prize 受賞
- [5] S. N. Nakamura, “Topics on (e, e'K⁺) spectroscopy of Lambda hypernuclei at JLab,” 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (Hawaii2018)(Invited Talk), Hawaii, USA, Oct. 23–27, 2018.

(書籍)

- [1] 中村哲, (パリティ編集委員会編) 物理科学 この1年 2020 「電子で作って探る“奇妙な”原子核：最強電子線施設 JLab におけるハイパー核電磁生成分光」, 丸善出版 2020年1月 (ISBN: 9784621304860)

(主催シンポジウム)

- [1] S.N.Nakamura (School Chair), International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2019), 2019.9.5-8, Sendai, JAPAN

(アウトリーチ活動)

- [1] Masashi Kaneta, Detectors for Measurement of Charged Particles in High Energy/Nuclear Physics スクール講師, IEEE NPSS International School for Real Time Systems 2019, Univ. of Malaya, November 2019.

【B01】計画研究

(雑誌)

- [1] *I. H. Hashim, H. Ejiri, F. Othman, F. Ibrahim, F. Soberi, N.N.A.M.A. Ghani, T. Shima, A. Sato, K. Ninomiya, “Nuclear isotope production by ordinary muon capture reaction”, Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. Sec. A, 963, 163749 (2020)
- [2] *二宮 和彦, 新倉 潤, 佐藤 朗, 寺田 健太郎, 齋藤 岳志, 松崎 禎一郎, 友野 大, 川島 祥孝, 篠原 厚, 久保 謙哉, 齋藤 努, “連続ミュオン源 RCNP-MuSIC を用いた非接触での物体内部の元素濃度分析実験”, Radioisotopes, 69, 13-17(2020)
- [3] *K. Ninomiya, M. Kajino, M. Inagaki, K. Terada, A. Sato, D. Tomono, Y. Kawashima, A. Shinohara, “Per atom muon capture ratios and effects of molecular structure on muon capture by γ -Fe₂O₃ and Fe₃O₄”, J. Radioanal. Nucl. Chem., 324, 403-408 (2020)
- [4] *K. Ninomiya, “Non-destructive, position-selective, and multi-elemental analysis method involving negative muons”, J. Nucl. Radiochem. Sci., 19, 8-13 (2019)
- [5] Y. Hirano, K. Ninomiya, *S. Yamamoto, “Estimation of dose and light distributions in water during irradiation of muon beams”, Physica Scripta, 94, 125804 (2019)
- [6] T. Kudo, *K. Ninomiya, P. Strasser, K. Terada, Y. Kawai, M. Tampo, Y. Miyake, A. Shinohara, K. M. Kubo, “Development of a non-destructive isotopic analysis method by gamma-ray emission measurement after negative muon irradiation”, J. Radioanal. Nucl. Chem., 322, 1299-1303 (2019)
- [7] *K. Ninomiya, T. Kudo, P. Strasser, K. Terada, Y. Kawai, M. Tampo, Y. Miyake, A. Shinohara, K. M. Kubo, “Development of non-destructive isotopic analysis methods using muon beams and their application to the analysis of lead”, J. Radioanal. Nucl. Chem., 320, 801-805 (2019)
- [8] 齋藤努「日本刀の刀匠が伝承する卸し鉄の浸炭と脱炭における条件の相違」『Integrated Studies of Cultural Research Resources』pp.233-265, ミシガン大学出版局 (オンライン出版), 総頁 345 頁、(2019)
- [9] *K. Ninomiya, T. U. Ito, W. Higemoto, N. Kawamura, P. Strasser, T. Nagatomo, K. Shimomura, Y. Miyake, M. Kita, A. Shinohara, K. M. Kubo, T. Miura, “Negative Muon Capture Ratios for Nitrogen Oxide Molecules”, J. Radioanal. Nucl. Chem., 319, 767-773 (2019)
- [10] 齋藤努「鉛同位体比からみた日韓青銅資料の原料の産地」『国立歴史民俗博物館研究報告』第 213 集, ISSN 0286-7400、pp.69-125, (2019)
- [11] *澤田秀実, 齋藤努, 長柄毅一 「中国四国地方で出土した銅鏡からみた国産銅鉛原材料の産出地と使用開始時期」『国立歴史民俗博物館研究報告』第 213 集, ISSN 0286-7400、pp.31-41, (2019)

(書籍)

- [1] 齋藤努「鉛同位体比分析からわかること」『ここが変わる！ 日本の考古学 —先史・古代研究の最前線—』藤尾慎一郎・松木武彦編, pp.170-175, 吉川弘文館, 総頁 210 頁、章数 7 章、ISBN 978-4-642-08342-3、(2019)

2019年3月1日

(アウトリーチ活動)

- [1] サイエンスカフェ 2019.01.19 二宮和彦「素粒子ミュオンで考古学資料を透視する」 豊中市立中央公民館
- [2] 新聞記事 2019.08.20 朝日小学生新聞
- [3] 新聞記事 2019.08.26 朝日新聞 「その『お宝』、傷つけずに調べます 素粒子で文化財調査」
- [4] 新聞記事 2019.09.29 産経新聞 「ミュオン粒子で解く考古学 高い透過性 遺物内部を透視」

【B02】計画研究

(雑誌)

- [1] A four-body calculation of s-wave resonant scattering between positronium and antihydrogen atom, T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, K. Piszczatowski, S. Jonsell, P. Froelich, J. App. Phys., Conf. Proc. (accepted)
 - [2] 陽電子原子の三粒子描像による高精度構造解析 I: 束縛状態, 山下琢磨, 木野康志, 陽電子科学 (accepted)
 - [3] Towards prediction of the rates of antihydrogen positive ion production in antihydrogen-excited positronium reaction, T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, K. Piszczatowski, S. Jonsell, P. Froelich, AIP Conf. Proc., (accepted)
 - [4] External exposure dose estimation by electron spin resonance technique for wild Japanese macaque captured in Fukushima Prefecture, T. Oka, A. Takahashi, K. Koarai, Y. Mitsuyasu, Y. Kino, T. Sekine, Y. Shimizu, M. Chiba, T. Suzuki, K. Osaka, K. Sasaki, Y. Urushihara, S. Endo, M. Suzuki, H. Shinoda, M. Fukumoto, Radiat. Meas., (2020) 106315, available online- (in press)
 - [5] Relativistic corrections to the binding energy of positronic alkali-metal atoms, T. Yamashita, Y. Kino, Phys. Rev. A, **100** (2019) 062511(12 pages)
 - [6] Muon catalyzed fusion, present and future, A. Iiyoshi, Y. Kino, M. Sato, Y. Tanahashi, N. Yamamoto, S. Nakatani, T. Yamashita, M. Tendler, O. Motojima, AIP Conf. Proc., **2179** (2019) 020010-7 pages
 - [7] Four-body treatment of the antihydrogen-positronium system: binding, structure, resonant states and collisions, P. Froelich, T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, K. Piszczatowski, S. Jonsell, Hyp. Interact., **240** (2019) 46-(16 pages)
 - [8] Substituent effect on the yield of unpaired electrons in DNA bases studied by electron paramagnetic resonance, T. Oka, A. Yokoya, K. Fujii, Y. Kino, T. Sekine, App. Phys. Lett., **113** (2018) 243701-(4 pages)
 - [9] Coupled channel study of antihydrogen-hydrogen molecular resonance state, T. Yamashita, Y. Kino, Jpn. J. App. Phys., Conf. Proc., **7** (2018) 011004(9 pages)
 - [10] Coupled channel effects on resonance states of positronic alkali atom, T. Yamashita, Y. Kino, Eur. Phys. J. D, **72** (2018) 13(9 pages)
- (学会発表)

- [1] 木野康志,低温高密度ミュオン核融合(MCF)から IFMCF の理論の進展, シンポジウム「S3 飛翔型 (散逸系) ミュオン触媒核融合 (IFMCF) 炉の新展開」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会, 中部大学, 2019/11/30
- [2] 佐藤元泰,IFMCF 炉の基本パラメータ, シンポジウム「S3 飛翔型 (散逸系) ミュオン触媒核融合 (IFMCF) 炉の新展開」、第 36 回プラズマ・核融合学会年会, 中部大学, 2019/11/30
- [3] Calculation of positronium-hydrogen atom reaction and its application to antihydrogen physics, T. Yamashita, Y. Kino, et al., JWPS2019, Nara, Japan, 2019/10/29 (invited talk)
- [4] Towards prediction of the rates of antihydrogen positive ion production in antihydrogen-excited positronium reaction, T. Yamashita, Y. Kino, et al., ICPEAC XXXI, Deauville, France, 2019/7/27. (special report)
- [5] Energy levels and stabilities of muonic molecule in muon catalyzed fusion, Y. Kino, ICCMSE 2019, Rhodes, Greece, 2019/5/4. (Invited talk)

【B03】計画研究

(雑誌)

- [1] F. Boulay, A. Takamine (6th/23), H. Ueno (45th), H. Yamazaki (46th) *et al.*, “g-Factor of the ⁹⁹Zr (7/2⁺) isomer: Monopole evolution in shape coexisting region,” Phys. Rev. Lett. **124**, 112501-1–6 (2020).
- [2] P. Laffez, A. Yamamoto (6th/6) *et al.*, “Growth of polycrystalline Pr₄Ni₃O₁₀ thin films for intermediate temperature solid oxide fuel cell cathode by radio frequency magnetron co-sputtering,” Thin Solid Films **693**, 137705 (2020).
- [3] Y. Ichikawa, A. Takamine (4th/45), H. Ueno (43rd), H. Yamazaki (44th) *et al.*, “Measurement of the magnetic moment of ⁷⁵Cu reveals the interplay between nuclear shell evolution and shape deformation,” Nat. Phys. **15**, 321–325 (2019).
- [4] L. C. Tao, A. Takamine (5th/23), H. Yamazaki (19th), H. Ueno (21st) *et al.*, “Negative parity states in ³⁹Cl configured by crossing major shell orbits,” Chin. Phys. Lett. **36**, 062101-1–4 (2019).
- [5] D. S. Ahn, H. Ueno (19th/21) *et al.*, “Location of the neutron dripline at fluorine and neon,” Phys. Rev. Lett. **123**, 212501-1–6 (2019). [Featured in Physics] [Editors' Suggestion]
- [6] H. Murayama, A. Yamamoto (8th/14) *et al.*, “Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa₂CuO_{4+δ},” Nat. Commun. **10**, 3282-1–7 (2019). [Editors' Highlights]
- [7] Y. Ito, A. Takamine (22nd/26) *et al.*, “First mass measurements of nuclides around Z = 100 with a multireflection time-of-flight mass spectrograph,” Phys. Rev. Lett. **120**, 152501 (2018).

- [8] O. B. Tarasov, H. Ueno (28th/30) *et al.*, “Discovery of ⁶⁰Ca and implications for the stability of ⁷⁰Ca,” Phys. Rev. Lett. **121**, 022501-1-6 (2018). [Editors' Suggestion]
(学会発表)
- [1] A. Takamine (invited), “Recent progress in the development of gas cells, SHE results combining GARIS with GASCELL+MRTOF,” Expert Meeting on Next-Generation Fragment Separators 2019, Darmstadt, Germany, September 30–October 3, 2019.
- [2] H. Ueno (invited), “Nuclear-physics research based on RI spin orientation technique,” XXXVI Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland September 1–7, 2019.
- [3] 高峰愛子, 「高偏極 RI ビームの生成と核・物質科学研究への応用」, 新学術領域研究「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」キックオフシンポジウム, 宮城県仙台市(東北大学青葉山キャンパス), 2018年12月17–18日。
(ホームページ)
- [1] 理研記者発表「ジルコニウム同位体は励起状態でも突然変形する」, 2020年3月17日。
理研 HP: https://www.riken.jp/press/2020/20200317_2/index.html
- [2] 理研&東京大学共同記者発表, 「磁気モーメントから分かる銅同位体の新たな姿 – 極限までスピン整列度を高めた RI ビームを駆使して測定に成功 –」, 2019年1月30日。
理研 HP: https://www.riken.jp/press/2019/20190130_2/
東京大学 HP: <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/6251/>
計算基礎科学連携拠点 HP: URL: <https://www.jicfus.jp/jp/190130pressrelease/>
(アウトリーチ活動)
- [1] 上野秀樹, 愛媛県総合科学博物館 国際周期表年特別展 2019「理化学研究所のニホニウム模型をつくろう」, 愛媛県総合科学博物館, 2020年1月18–19日。
- [2] 高峰愛子, 理研 DAY: 研究者と話そう! 「原子核を捕まえて光でみる」, 東京都科学技術館, 2019年12月15日。
- [3] 上野秀樹, 北海道 150 年 子ども未来・夢キャンパス 「ほっかいどうサイエンス・フェスティバル」, 北海道札幌市(北海道立総合体育センター 北海きたえーる), 2018年8月6–7日。
- 【C01】 計画研究
(雑誌)
- [1] T. Nakano, M. Sakai, K. Torikai, Y. Suzuki, S. Takeda, S. Noda, M. Yamaguchi, Y. Nagao, M. Kikuchi, H. Odaka, T. Kamiya, N. Kawachi, S. Watanabe, K. Arakawa and T. Takahashi, “Imaging of 99mTc-DMSA and 18F-FDG in humans using a Si/CdTe Compton camera”, Phys. Med. Biol. **65** (2020) (物理、医学、薬学共同成果)
- [2] T. Kawamura* *et al.*, “Development of a Low-Noise Front-end ASIC for CdTe Detectors”, NIMAP, accepted for publication (2020)
- [3] K. Furukawa, S. Nagasawa*, *et al.*, “Imaging and spectral performance of a 60 μm pitch CdTe double-sided strip detector”, NIMAP, accepted for publication (2020).
- [4] Peter Caradonna, David Reutens, Tadayuki Takahashi, Shinichiro Takeda, Viktor, Vegh, Probing entanglement in Compton interactions, Journal of Physics Communications, Volume 3, Number 10, (2019) 10.1088/2399-6528/ab45db (物理学と医学融合)
- [5] H. Iwasaki, Y. Ichinohe, Y. Uchiyama, “X-ray study of spatial structures in Tycho's supernova remnant using unsupervised deep learning”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 488, Issue 3, p.4106-4116 (2019)
(学会発表)
- [1] サンペトラ オルテア, 小池直義, 佐谷秀行 (招待講演) 「脳腫瘍幹細胞の低酸素応答と放射線抵抗性の克服」 日本放射線腫瘍学会第32回学術大会, 名古屋国際会議場, 2019年11月21-23日
- [2] 梅田 泉, 森田智子, 浜根友仁子, 大貫和信, 柳下淳, 武田伸一郎, 高橋忠幸, 藤井博史, ラジオセラノスティック製剤を目指した放射性リポソーム, 第59回日本核医学会(松山), 2019/11/1-3 (物理、医学、薬学共同成果)
- [3] 武田伸一郎 (招待講演) 「CdTe検出器を用いた硬X線イメージング研究」 The 2nd Workshop on Quantum Beam Imaging, イーグレ姫路, 兵庫県, 2019年9月24–25日
- [4] T. Takahashi (invited), “Interdisciplinary activities for cancer research based on advanced technology of in vivo gamma-ray imaging”, PACIFIC2019, Moorea, French Polynesia, Sep 1-6, 2019
- [5] 柳下 淳, 武田伸一郎, 織田 忠, 桂川美穂, 藪 悟郎, 河村天陽, 高橋忠幸, 渡辺伸, 水間 広, 金山洋介, 大貫和信, 梅田泉, 藤井博史, 「超高分解能 CdTe-SPECT 試作機によるマルチプローブ生体イメージングへの展開」 日本分子イメージング学会: 第14回総会学術集会, 北海道立道民活動センター, 2019年5月23-24日 (物理、医学、薬学共同成果)

- [6] 高橋忠幸 (招待講演), “Novel and interdisciplinary application of space hard X-ray and gamma-ray detectors” ,The 1st Workshop on Quantum Beam Imaging,京都市, 2018年9月25-26日
(特許)
- [1] 柳下 淳ほか:アルデヒドロゲナーゼ 1 A1 検出用青色蛍光プローブ, 出願番号:特願 2020-014846
(ホームページ)
- [1] 東京大学・群馬大学共同記者発表「新たな高性能画像診断機器, 医療用コンプトンカメラの臨床試験に成功」(<https://www.ipmu.jp/ja/20190724-compton-camera>)
(アウトリーチ活動)
- [1] 武田伸一郎, 柳下 淳,「宇宙を見る目で生命を見る」, Kavli IPMU ものしり新聞, 第9号, 2020年3月.
[2] 能町正治,「鏡の中の世界」雲雀ヶ丘学園高校模擬講義, 2019年6月29日
[3] 能町正治,「光子を実感する」, KEK サマーチャレンジ, 2018年8月17-25日
- 【C02】計画研究
(雑誌)
- [1] *K. Ninomiya, T. U. Ito, W. Higemoto, N. Kawamura, P. Strasser, T. Nagatomo, K. Shimomura, Y. Miyake, M. Kita, A. Shinohara, K. M. Kubo, and T. Miura, " Negative muon capture ratios for nitrogen oxide molecules ", J. Radioanal. Nucl. Chem. 319 (2019) 767-773
[2] *Y. Miyake, K. Shimomura, N.Kawamura, A.Koda, P.Strasser, K.M.Kojima, H.Fujimori. S. Makimura, Y. Ikedo, Y. Kobayashi, J. Nakamura, Y. Oishi, S. Takeshita, T. Adachi, A.D.Pant, H. Okabe, S.Matoba, M. Tampo, M. Hiraishi, K.Hamada, S. Doiuchi, W. Higemoto, T. U. Ito, R. Kadono, “J-PARC Muon Facility, MUSE”, JPS Conf. Proc.21(2018)011054(1-6)
(学会発表)
- [1] (招待講演)三宅康博, “Ultra Slow Muon Generation and Its Application for Transmission Muon Microscopy at J-PARC Muon Facility, MUSE”, The 3rd J-PARC Symposium (J-PARC2019), つくば国際会議場, 2019/9/23-26
[2] (招待講演)三宅康博, “Ultra Slow Muon and Low Energy Muon”, NUFAC2019, The Grand Hotel Daegu (Korea), 2019/08/26-31
[3] Hiroaki Natori , “Development of very slow negative muon beam in J-PARC”, NUFAC2019, The Grand Hotel, Daegu, (Korea), 2019/8/30
[4] (招待講演)三宅 康博, “J-PARC Muon Facility, MUSE -Status and Recent Activity-”, Physics of muonium and related topics, Nambu-hall, Osaka Univ., 2018/12/10-11,
(ホームページ)
- [1] 最先端負ミュオンビーム開発 <http://msl-www.kek.jp/MuonScience-G/>
(アウトリーチ活動)
- [1] 三宅康博, 負ミュオン元素戦略, 「J-PARC におけるミュオン研究」, 2020.2.3,
[2] 三宅康博, 第2回文理融合シンポジウム「量子ビームで歴史を探るー加速器が紡ぐ文理融合の地平ー」, 大阪大学 中之島センター, 参加人数 70 名, 2019.12.25-26,
[3] 三宅康博, 量子放射線利用普及連絡協議会, 虎ノ門琴平タワー大会議室, 「身近な素粒子ミュオンを用いた研究ー文理融合の試みー」, 2019.11.21,
[4] 三宅康博, 第1回文理融合シンポジウム「量子ビームで歴史を探るー加速器が紡ぐ文理融合の地平ー」, 国立科学博物館日本館2階 講堂, 参加人数 105 名, 2019.7.27-28
[5] 三宅康博, 出前講義, 岡山県立岡山芳泉高等学校, 「身近な素粒子ミュオンを用いた研究」, 2019.7.20
[6] 日経産業新聞朝刊, 「ミュオン粒子で物質を見る世界初の顕微鏡目指す:三宅康博 (日経サイエンス 2020.1月号)」要約記事掲載, 2020.4.28
[7] 学士院 PJA ニュースレターNo.12, インタビュー永嶺謙忠×聞き手 高崎史彦, 三宅康博他, 2020.3月号
[8] 日経サイエンス, フロントランナー挑む 第97回「ミュオン粒子で物質を見る世界初の顕微鏡目指す:三宅康博」, 2020.1月号
[9] 産経新聞, 「ミュオン粒子で解く考古学 高い透過性 遺物内部を透視」, 2019.09.29
[10] J-PARC-News 172号, 第1回文理融合シンポジウム 量子ビームで歴史を探るー加速器が紡ぐ文理融合の地平ー, 2019.8.30
[11] 朝日新聞, 「その『お宝』, 傷つけずに調べます 素粒子で文化財調査」, 2019.08.26
[12] 日経産業新聞, 「ミュオン」活用 効率高く 新たな着想で研究, 2019.4.16
- 物質構造科学研究所トピックス「負ミュオンで蛭藻(ひるも)金の謎を解くー文理融合プロジェクト」, 2019.2.12
- 【D01】公募研究
(学会発表)
- [1] 木村智樹, 岩切 渉, 山崎 敦, 村上 豪, 土屋 史紀, 吉岡 和夫, 北 元, 桑原 正輝, 鳥海 森, 2018-19年のひさき-NICER-X線望遠鏡協調観測で発見された近接連星系における恒星フレア, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第146回総会・講演会, 熊本市国際交流会館, 2019年10月26日
[2] 佐藤方実, 小林義男, 山田康洋, 久保謙哉, 三原基嗣, 佐藤 渉, 長友 傑, 佐藤真二, 北川敦志: “鉄水素化物における Fe 原子の化学状態”, 京大複合研専門研究会「短寿命 RI を用いた核分光と核物性研究VI」兼「第11回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会」, 熊取, 1月 (2020).

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。

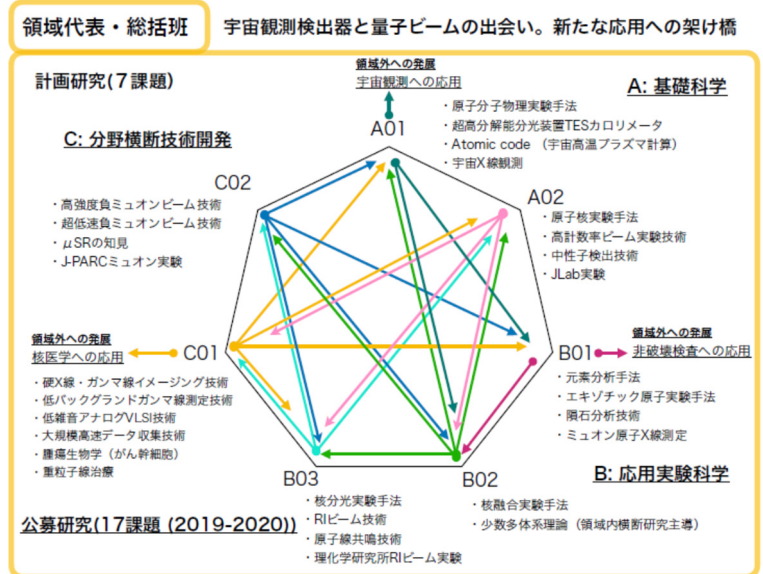
本新学術領域研究では、KEK での低エネルギー反陽子実験、PEP や TRISTAN 加速器における電子陽電子衝突実験など、素粒子実験を出自とし、大気球実験をへて、科学衛星やロケットを用いた宇宙ガンマ線観測をすすめてきた**領域代表者 高橋を中心に、専門分野の異なる7人の計画研究代表者が、それぞれの広い経験と人的ネットワークを活かし、これまででない異分野融合の領域**を立ち上げることを目指して研究を進めている。基礎科学に関する A01、A02、応用実験科学 B01、B02、B03 そして分野横断技術開発 C01、C02 の3分野の連携をはかり、全体の方針を定める総括班は領域代表を責任者として計画研究代表者、さらに、国際協力や技術開発（リアルタイム処理標準化）、さらに研究の進捗評価を強化するために、それぞれでリーダーシップをとれる人材を配置した。総括班のメンバー、専門分野、担当を表に示す。

総括班は、各計画研究および公募研究の研究推進、連携の強化を行う。計画研究間の研究手法に関して協力関係を築き上げると同時に、領域全体の研究スケジュールの管理を行う。定期的な班会議や若手の会を行い、分野横断的に自由な議論をする機会を提供している。本領域の成果についてのホームページを作成し、本領域の研究の進展、研究成果の解説、将来のビジョン等の一般への情報発信を行ってきた。国際的研究への展開を視野にいれ、国際活動を支援している。

	名前	所属	専門分野	総括班内の役割	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2
代表	高橋忠幸	東京大	高エネルギー宇宙物理	領域研究統括	■		■			○	
分担	東 俊行	理研	原子分子物理実験	統括補佐、若手育成	○	■		■			
分担	中村 哲	東北大	原子核物理実験	統括補佐、事務局		○		■			
分担	二宮 和彦	大阪大	エキゾチック原子化学	公募研究（実験）	■		○				■
分担	木野 康志	東北大	原子核・原子分子理論	理論研究取りまとめ		←		○	→		
分担	上野 秀樹	理研	原子核物理実験	広報				○			■
分担	能町 正治	大阪大	高エネルギー物理実験	若手育成、国際活動支援		■		■		○	■
分担	三宅 康博	KEK	ミュオン物理実験	公募研究（全体）		■					○
分担	Patrick Strasser	KEK	原子核物理実験	国際活動支援	←					○	→
分担	渡辺 伸	JAXA	高エネルギー宇宙物理	技術開発調整	○	←				→	
協力	酒井 英行	理研	原子核物理実験	評価担当	←					→	

本領域は、右図に示すように、一見、異なる舞台の上で研究を行う研究者グループが、お互い、世界に誇る技術をもちより、異分野融合のスタイルで実験を行う。連携を促進するために、総括班メンバーは、その専門分野に応じて、各計画研究に相互に入り込んでいる。

さらに**研究組織間の人的交流・循環**も積極的に進めている。B01 計画研究で雇用した邱(博士研究員)はデータ解析のエキスパートであったが実験技術に関する経験が無かったのでまず、**C01 計画研究において先端γ線測定器の使い方に習熟したのち、B01 の研究を本格的に推進**している。また、A01 計画研究において超伝導 TES 検出器のエキスパートである岡田はその卓越した実験技術を活かして B02 計画研究を強力に牽引するため**A01 班拠点である理研の任期付き研究員から B02 班拠点である中部大学に准教授として異動し、所属する計画研究班も A01 から B02 に変更された。**



公募研究との新たな共同研究も進んでいる。例えば **C01 研究領域の公募研究「超高分解能／多核種同時測定インビボイメージングを可能にする分子プローブの開発」** (代表 梅田) では、薬物キャリアであるリポソームに画像診断に適した ^{186}Re を封入する新しい試みをスタートしているが、これは **B03 班拠点である理研仁科センターの加速器**を用いることで**初めて可能**になった研究である。

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。研究協力者やポストドク、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。

	H30	R1
若手研究者(39歳以下) 人数	59人	64人
スタッフ(准教授/助教/研究員など)	9人	10人
博士研究員(任期付き助教を含む)	13人	14人
本新学術予算での博士研究員雇用者	0人	3人
大学院生(博士課程)	17人	13人
大学院生(修士課程)	22人	29人
博士取得者 人数	6人	4人
修士取得者 人数	10人	11人

本研究領域では、下記の表の数字に現れているように、多くの若手研究者が研究遂行に関わった。その中には、B01 班の研究代表である二宮和彦(阪大)、公募研究の代表の石川貴嗣(東北大)、本多良太郎(東北大)、小高裕和(東大)、山崎高幸(KEK)、梅垣いづみ(豊田中研)といった若手 PI をはじめ、新たに雇用された博士研究員 A01:奥村拓馬(理研)、B01:邱奕寰(阪大)、B02:奥津賢一(東北大)、B03:今村慧(理研)、C01:Pietro Caradonna(東大)、C02:名取寛顕(KEK)を含む多くの助教や研究員が活躍している。また、参加大学院生も総数 42 名にのぼる。

加えて、順調なキャリアパス展開として A01 班で活躍してきた岡田信二(理研 研究員→中部大 准教授)が B02 班の研究を主導するため転出昇任するなど、総数 4 名が昇任している。

具体的に計画していた若手研究者の育成への取り組みは、**1) 若手研究者・大学院生の研究発表・交流のための若手の会を開くこと**と、**2) 検出器やデータ収集装置などの技術を若手に伝承するために計画研究の相互乗り入れによる実験への参加の機会をつくる**という2つが挙げられる。これらは総括班の主導のもと、大きな成果を上げつつある。具体的には、



実機を使って講習を受ける若手の様子

1) 若手ワードウェア研究会を初年度に実施した。

- **新学術領域 若手ハードウェア研究会** (2019年3月7-8日、大阪大学豊中キャンパス、参加者数 30名)

(量子ビームを用いた様々な研究に使われる検出器開発に携わる大学院生、学部生が、研究成果 を発表し、情報交換、知識の幅を広げることを目的とした。実際に手を動かす演習も実施。)

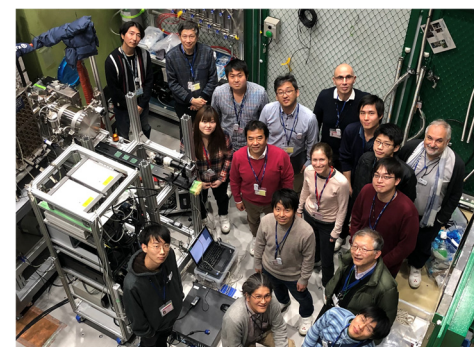
発表し、情報交換、知識の幅を広げることを目的とした。

国際若手スクールも既に2回、以下のように共催した。

- **2019 ストレンジネス核物理国際スクール** (2019年9月5-8日、東北大学青葉山キャンパス、参加者数 99名) (共催) (実験と理論の両方から関連する主題を概説し、最近の進歩と分野の展望に関する話題を提供する若手研究者向け講演を実施。さらに若手研究者によるセッションを開催し、若手研究者による発表の機会を提供。)

- **IEEE NPSS 2019 国際リアルタイム計測スクール** (2019年11月10-15日、マラヤ大学、参加者数38名) (放射線検出器とその応用の分野で学ぶ学生に、リアルタイム実験の開発と制御に関する実践的な経験を提供した。最先端の経験を持つ放射線測定の実験室の専門家による講義と実験室演習から構成。)

さらに、若手講師による「量子ビーム応用セミナー」も計測技術から探求する科学まで様々なテーマで10数回開催した。



J-PARC における負ミュオン実験参加者

2) 異なる計画研究グループメンバーの相互乗り入れによる実験参加が本研究領域の特色であり、例えば、J-PARCで実施されたA01, B01, B02, C01, C02に関連する実験では、宇宙物理、原子核物理、原子物理、核化学、ビーム科学、プラズマ物理などを専門とする若手研究者を中心とする総勢20名前後が毎回参加して実験を実施することができた。ここでの異分野交流は今後の研究進展にとってかけがえのない財産となってゆくと期待する。

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。

まず、本研究領域において横串の役割を果たし、複数の実験に利用する共用装置として展開しつつある超伝導 TES カロリメータと CdTe 検出器について記述する。

A01 班だけでなく今後 B01 班や B02 班で鍵となるガンマ線用超伝導 TES カロリメータに向けた検討において大幅な進展があったため、当初 2020 年度に購入予定としていた最も高額な購入物品である超伝導検出器用の断熱消磁冷凍機を前倒し使用申請を行い早期購入した。これにより早期に振動・電気ノイズなどの問題点を早期に洗い出し十分に処理できる時間を設けることができた。新信号読出し系の開発も早く進み、先に導入予定であった硬 X 線用超伝導 TES カロリメータの開発においてもこれを採用することとなった。このため新読出し系の導入試験を先に実施し、2019 年度に予定していた硬 X 線用超伝導 TES カロリメータの開発を 2020 年度に繰り越すこととなった。このように予想より順調な開発に応じて柔軟な予算を執行した。一方で、CdTe 検出器に関してはミュオンによる三次元元素分析に必要な CdTe イメージャの開発が B01 班と C01 班を中心に進められてきた。具体的には連携を密にして仕様の決定や開発を行っており、ASIC など一部の部品については共通化することで開発のコスト低減を行っている。すでに CdTe イメージャ小型・可搬化のための試作機を作成し性能評価を行っており、マシンタイムでの性能評価も行っている。超伝導 TES カロリメータと CdTe 検出器を利用する A01、B01、C01 班のいずれのプロジェクトも、これまでの J-PARC におけるマシンタイムにおいて、測定システムを標準化することにより開発の効率化や予算の圧縮を行っている。

その他の大きな予算としては、A02 班の大型荷電粒子分離電磁石が挙げられる。設計の再検討を行うこととなり 2018 年度の予算の一部を繰り越すことにより、米国側研究者、技術者との慎重な議論を重ねた上で電磁石の再設計を進め、負電荷偏向電磁石と正電荷偏向電磁石の設計を同時に見直すことで最適化した。その結果 2018 年度に同時に製作することにより両方の偏向電磁石の完成時期を大きく遅らせることなく、2019 年度内に無事完成することができた。B02 班では、マッハ衝撃波風洞実験装置の開発のため、真空チェンバーや計測システムを導入した。B03 班では、鍵となるレーザー発振周波数の高度安定化を実現するための高精度波長計と周波数安定化装置が購入された。C01 班では、医学研究者との交流や協力体制の強化のための旅費や Drug Delivery の研究を進めるための薬学の博士号を持つ研究者の雇用といった特色のある研究費が計上されている。C02 班では今後のトリチウムを用いた本格的実験の安全を担保するために予算が繰り越されている。加えて、B02 班や C01 班を中心に、本領域で展開する分野横断実験技術開発のために必要な測定器、電子回路、さらにイメージング実験や検出器開発を進めるために必要な消耗品等を一括して購入している。

総括班の活動としては、積極的に横断的な開発計画を主導するために初年度 11 月にはキックオフ全体会議を第一回公開シンポジウムとして開催し、3 月には若手ハードウェア研究会を行った。また、本領域の特徴である異分野融合、特にがん研究など医学研究との融合を強化するための国際会議を開催し、第 1 回量子線イメージング研究会を共催するなど横断的研究を支える研究会に積極的に予算を使用した。国際若手スクールなど、国際協力の活性化のための支援を行った。

人件費の使い方という観点からは、総括班の主導のもと、多くの班で雇用された博士研究員が他の班の実験や開発に乗り入れることよって、効果的に研究を進めていることが本領域研究の特色である。具体的には B01 班:邱奕寰氏の C01 班への乗り入れ、B02 班:奥津賢一氏の C02 班との共同研究、C01 班:Pietro Caradonna 氏の A01、B01 実験への参加などが挙げられる。

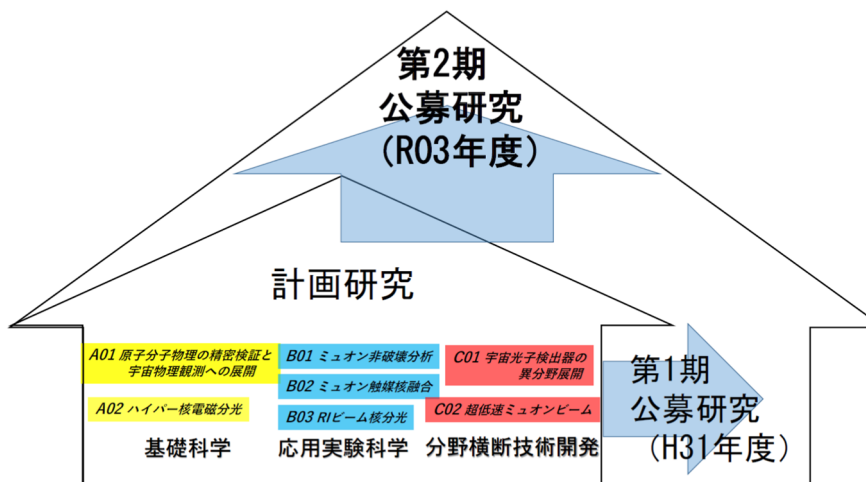
最後に、理論研究に関しては、B02 班では九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータが使用されている。厳しい審査を通過して専有利用が認められたためコストや待ち時間の上で大きな貢献をしていることを付記する。

今後は、計画に沿って開発を続けるための物品費を計上する一方、相互交流を加速するためのさらなる博士研究員の採用や研究会などの開催にも努めたい。

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、最先端検出器、エキゾチック量子ビーム技術をベースに基礎科学、応用実験科学、分野横断技術開発を強力に推進するために7つの計画研究班を配し、各計画研究間の有機的な連携により新たな応用研究への道を切り開くことを目指す。しかし、最先端検出器技術、エキゾチック量子ビーム研究の全分野を網羅するわけではない。公募研究は計画研究とは相補的に本領域研究を推進することができる研究テーマを選ぶ方針を立てた。



平成31年度(2019)に開始した公募研究では、本領域研究に専門家がいらない実験技術、萌芽的実験技術の開発、および、まったく新たな研究手法による基礎科学、応用科学研究に重点を置き、計画研究と直交性の高い研究を中心に公募研究を選び、本新学術領域がカバーする対象を広げることを目指した。

令和3年度(2021)に公募する第二期の公募研究では、領域内を横断するような研究、あるいは発足時に提示されていた領域内研究成果を異分野に応用するような領域拡大に資する研究、さらに量子ビーム実験や宇宙観測、医学研究において革新をもたらすような検出器の研究に加えて、**計画研究および第一期の公募研究の結果により新たに開発された研究手法や実験技術をベースに、応用/基礎研究の深化を図る研究などを募集する。**

具体的な一例としては、これまで宇宙観測から生まれた硬X線・ガンマ線イメージング技術をガン診断に応用するという研究を計画研究C01で推し進めているが、公募研究で中枢リンパ系の循環動態の研究、脳内微小変性タンパク質沈着の様子の観測といったガン診断以外の医学応用との「新たな出会い」が生じており、第一期の公募計画に参加していない多くのグループから興味を持たれている。今後はガン診断応用技術のさらなる展開と並行して、まだ開始されていない「新たな出会い」を掘り起こすと同時、既に研究が開始したガン診断以外の応用研究が単なる「出会い」で終わるのではなく、実用的技術に繋がるような研究の深化を目指す。

ミュオンビームを用いた応用研究である B01 班と宇宙観測検出器を開発、応用を展開している C01 班に加え、ミュオンを用いて基礎科学研究を展開している A01 班は J-PARC ミュオン施設におけるビームタイム申請を**共同でミュオン共同利用 S 1 課題** (KEK に実験装置を建設、開発およびこれを用いた利用研究を目的とする大型実験) として申請し、先行して実施が認められたビームタイムは共同で実験を遂行して大きな成果を上げつつある。また、ミュオン触媒核融合をベースに応用研究を展開する B02 班と先端ビーム開発を進める C02 班も共同で J-PARC におけるミュオン実験を遂行している。このように本新学術領域研究がスタートする前は一見無関係に見えた研究が、本領域の計画研究として結集したことにより共同研究が進み、一部融合しつつある。この流れは今後も強力に総括班でサポートしていく。

このように**先端宇宙観測検出器技術とミュオンを用いた基礎・応用科学研究との融合は予想以上の成功と展開を見せている**が、一方、それ以外の**基礎科学研究との融合はまだ十分とは言えない**。光子、RIビーム先端加速器実験で蓄積されたビッグデータ解析技術、精密シミュレーションによる実験デザイン、高度データ収集技術、希少標的取り扱い技術を、ミュオンビームを用いた希少物質非破壊検査等に応用するという流れはできつつある。しかし、今後は逆の流れ、つまり宇宙先端検出器技術を用いて精力的に展開しているミュオンを用いた**応用研究から基礎科学研究への技術展開、融合**を進めていく必要があると認識している。

このような視点のもと現在検討しているのが、C01班が開発した高分解能CdTe検出器を、これまでは半導体検出器は直ぐに放射線損傷を受けてしまうため使用できないとされてきた高強度光子・電子ビーム環境下において原子核 γ 線検出実験に適用することである。さらに、CERNが開発した高速ピクセル検出器用ASIC TimePix3を用いて、新しい検出器応用をはかる。C01班が中心となって、SiやCdTeを搭載したセンサーの研究が進められ、CERNの開発チームとの情報交換も始められた。すでに、負ミュオンビームの特性評価が進められ、ミュオンを用いた物性研究手段である μ SR実験への応用も検討されている。そのイメージング性能、エネルギー測定、時間分解能の良さ ($\Delta=1.7$ ns) を活かした荷電粒子飛跡検出器として基礎科学研究への展開も期待できる。CdTe検出器をA02班が研究を推進する東北大学ELPHにおいて高強度光子ビーム下でテストすること、Timepix検出器をA01班が実験を展開しているHIMACでビームに晒すテストなどが予定されている。

このような実験技術を媒介とする基礎科学、応用科学、技術開発をさらに強力に推し進める為に、総括班内部にバーチャルな「計画研究」を立ち上げ、融合研究を強力に牽引することを検討している。

理論研究に関しては、B01班内のミュオン触媒核融合分野においては非常に大きな進展を見せているが、他班との連携は今以上に強化する必要があると認識している。これまでこの理論分野での公募研究が無かったため、本領域で展開する多種多様な研究を強力に理論研究で束ねるため、理論分野での公募研究を強化したいと考えている。

また、総括班では、本領域のwebを整備し、ニュースレターを発行するなどの積極的な情報発信も勢力的に取り組んでいる。ニュースレターでは計画研究、公募研究代表の顔写真と研究のサマリを掲載し、領域内外のこれまでオーバーラップが無かった研究者とのコミュニケーションのきっかけになることを期待し、今後の領域会議等での活発な議論、研究の融合を促すようにしたい。

本領域では、米国 NIST、フランス エコールポリテクニク、米国 ジェファーソン研究所、ドイツ マインツ大学、米国 アリゾナ大学等との共同研究を精力的に行ってきた。今後はこれをさらに推し進め各計画研究を中心に広範な国際協力を実施する。これまでの国際協力のネットワークを発展させ、双方向の国際共同研究を展開する。領域全体でこれらの共同研究の機会を生かし、研究ネットワークのさらなる強化と新たな出会いを図る。本領域研究で開催する国際会議、スクール等の機会をフルに活用し情報発信を行い、上記の研究機関はもちろん、それ以外の研究機関との研究強化を目指す。

もちろん、COVID-19の影響が国際共同研究に与える影響は大きく、今後の展開も予想がつかない部分は多い。総括班としては、web会議の組織・支援をこれまで以上に行い、例えリモートであっても国際共同研究が推進できるようサポートを行う。若手研究者向けスクール、セミナーなども対面での実施が難しい場合はリモートでの開催を行い、これまでの国際協力発展の流れを継続するように努力する。

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。

総括班評価は、以下の3名が担当している。

釜江 常好 東京大学大学院理学系研究科(理学部) 名誉教授

川合 眞紀 自然科学研究機構 分子科学研究所 所長

中野 貴志 大阪大学核物理研究センター センター長

以下、3名から頂いたコメントを原文のまま掲載する。

釜江 常好

本計画は、世界をリードしているエキスパートを結集することで、多くの分野を統合し、新しい研究の潮流を生み出そうとする、野心的な試みである。分野間の予算や人員配分を安定化しようとする日本では、大学では入学時に、研究所では採用時に、進路を、ほぼ、固定する。この囲い込みの風習は、広く認識されているが、着実に広がりつつある。欠点を補完するにも、学際分野、国際交流などの細いチャンネルを、現体制の、隙間に見つけるしかない。組織を固定的に考える朱子学の亡霊が、官僚体制に残っている気がする。

この計画の研究者たちは、近未来に直面する研究体制の再編を、予見し、社会のニーズに、分野を横断的に統合し、解決しようとして試みている。国際的な経験と視野をもつゆえ、この試みが必要と感じ、経験や装置を共有し合い、切磋琢磨している様子が見えてくる。

志の大きさゆえ、計画完遂への見通しに懸念を抱くところもある。その一つは、博士号を目指す大学院生の参加が、まだ足りないことである。博士号取得者の就職の道が限られる、日本社会の問題でもあるが、世界的に活躍できる技術者を求めている企業は、非常に多い。アウトリーチの一つとして、「こんな技術を開拓しているのです」と訴える場を、学術振興会などと一緒に、考えるのはどうだろうか。その二は、最終ゴールを高く掲げるのは、必要だが、努力の一部は道半ばで期間が終わる可能性もあるだろう。その際、果実として、何を残せるか、明示することを提案したい。優れたPlanBを用意していたゆえに、全体として成功したプロジェクトは多い。ここの計画に、コメントしているので、検討してほしい。

X00 総括班 宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。

上に述べた、全体的なコメントは、総括班を対象としている。参加している研究者たちが、近未来の研究を、分野をまたぎ交流することで、新しい統合的な領域を拓こうとしている意欲を、高く評価したい。

上に書いた懸念が残るが、若手研究者の就職に関しては、既に数名が、准教授の職を得ていることは、うれしい。企業に対するアウトリーチを試みると、新しいベンチャー企業が生まれるかもしれない。

A01 負ミュオンビームによる原子分子物理の精密検証と宇宙物理観測への展開

順調に進んでいるとの印象を得たが、X線天文観測に使われる「atomic code の精密化」に関しては、どのようなコードを考えているのか。現存のCodeとの関係は。

A02 高エネルギー光子で探る原子核内部と中性子星深部

この分野も、主たる目標に向かって順調に進んでいると考える。しかし、中性子星深部の構造に関連した研究であると言っているが、具体的なことが、書かれていない。

B01 負ミュオンビームを用いた新たな非破壊元素分析法

X線や電子線を使って出来ないことが、どのように可能になるのか、具体例を書いてほしかった。

B02 マッハ衝撃波干渉 領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生

D_2+T_2 の混合ガスをラバールノズルに通して、マッハ衝撃波をつくる準備などが、大変だと想像する。Tの回収なども含めて、準備状況は、どうなのか。最終ゴールに達しない場合、どのような成果が残るのか。

B03 高偏極RIビームの生成と、核・物質科学研究への応用

幾つかのステップを、時系列に並べて、解決して行かねばならないように思える。最終ゴールにまで到達できなくても、有意義な結果が残ると想像しているが、実行計画の中で、少し書いてほしい。

C01 宇宙硬X線・ガンマ線検出テクノロジーの異分野への展開

多くの関連分野のノウハウを引き出し、統合する必要があると思える、チャレンジングな計画であるが、社会的必要性も高い研究課題と考える。本研究の期間内で、最終目的まで到達できないかもしれないが、臨床医学で利用されるまで、続けてほしい研究課題である。

C02 最先端負ミュオンビーム開発

この計画も、幾つかのステップを成功裏に完成させた先に、到達できる、息の長いものだと考える。中間段階で得られる成果が、応用面でも果実を生むような配慮をしてほしい。

川合眞紀

2018 年秋に発足して以来、1 年半の研究活動の総括として、今回の中間評価報告書を拝見した。量子ビーム応用研究を総括する研究代表者の高橋忠幸博士の熱意溢れるリーダーシップと高度な検出技術をもつ優れた科学者からなるチームメンバーがこの間に集約的に進めてきた研究の成果に称賛の言葉を伝えたい。学問の各セクターで開発される技術は、セクターを超えて共有されることは少なく、この壁を打破することで、先端技術開発に新たな光が見えることが期待される。本領域の設置に大きな期待が寄せられたのも、宇宙観測や原子物理学で培われた検出器技術をこれらの分野を超えて共有することで、各々の分野での開発が加速されることに加え、それらの技術を物質材料科学や生命科学分野さらには医学分野での先端的な観測技術の開発につながることへの予感に基づいている。

この 1 年半の研究開発の進め方は、基本的には当初計画に基づいて進められてはいるが、より効果的な開発を目指して、実効性のある推進に期するために順番を変えたり、次年度との計画を入れ替えるということ各グループが堅実に実施しているところは好感が持てる。

また、応用研究と基盤研究の間のリエゾンを意識し、総括班メンバーが組織的に応用研究のテーマや公募研究の進捗状況を随時把握しながら、領域運営を進めており、多くの専門分野が参画する研究領域にはありがちな、個別研究を束ねた成果にならないように配慮されている。

特筆すべきチャレンジングな課題も散見される。負ミュオンをプローブとする非破壊元素分析法は、軽元素(Li, C, O)を含めた元素の 3 次元イメージングを目指すもので、微量分析への適応を目指して順調に開発が進んでいる。当面は、2019 年秋の「はやぶさ 2」が持ち帰る試料の分析に向けてフィジビリティスタディーが行われている。

今後の計画も堅実に実施されるものと思われ、領域研究終了時に医学応用も含めて科学への多くの貢献がなされるものと期待する。

中野貴志

「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」には、基礎科学、応用実験科学、分野横断技術開発の 3 つの研究分野がある。一見、強い相関のない様々な分野を活性化する仕組みの必要性が採択段階で指摘されていたが、それに答える形で各計画研究グループの進展状況を把握し、必要な助言を与える内部評価担当者が中間ピアレビューを実施して効果を上げている。また大強度ミュオンビームに関連する研究者は、開発グループからユーザーグループの全てを含む共同研究グループを設立し、開発も研究も同時に行うコアユーザーの育成が進んでいる。個々の研究分野については、まず、基礎科学分野では、X 線の広帯域にわたる精密分光、ラムダハイパー核の精密電磁分光による ΛN 相互作用の荷電対称性の破れなど、バリオン力の研究が推進されているが、A01 班の馬場彩氏(東京大学)が「X 線・ガンマ線観測による高エネルギー宇宙線の起源とその加速機構の解明」に関する研究で日本物理学会 第 1 回米沢富美子記念賞を受賞するなど着実に成果が上がっている。次に、応用実験科学では、負ミュオン特性 X 線によるバルクな試料に対する非破壊 3D イメージング元素分析法による地球外試料や考古物などを対象とした研究、高強度負ミュオンビームを用いたミュオン触媒核融合の学術的研究、高偏極 RI ビームを用いた β 線検出型超高感度 NMR 法による物質科学研究が推進されている。負ミュオンによる文化財調査は一般にも大きく報道される応用研究の潮流を作り、B01 班の二宮和彦氏(大阪大学)が「ミュオン特性 X 線を用いた定量的な非破壊元素分析手法の開発」に関する研究で 2019 年度 日本中間子科学会奨励賞を受賞した。分野横断技術開発分野においては、領域発展に必要な先端的検出器、負ミュオン超低速マイクロビームの開発、がん幹細胞を標的とした医学研究のために CdTe 半導体素子を応用した小動物用生体内 3D ガンマ線イメージング装置の開発など、医学・薬学の研究者との異分野共同研究が推進されているが、前者は前述の J-PARC の共同研究グループによるユーザーと開発者が一体となった有機的な推進、後者については出口を見据えた基礎研究の発展を促しており、本領域の設立による関連分野全体に対する波及効果は極めて大きいと評価できる。