

領域略称名：量子ビーム応用
領域番号：6007

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

「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5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 交付決定額 | 4 |
| 4 研究領域の目的及び概要 | 6 |
| 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況 | 7 |
| 6 研究目的の達成度及び主な成果 | 10 |
| 7 研究発表の状況 | 16 |
| 8 研究組織の連携体制 | 21 |
| 9 研究費の使用状況 | 22 |
| 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況 | 24 |
| 11 若手研究者の育成に関する取組実績 | 25 |
| 12 総括班評価者による評価 | 26 |

研究組織

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

1 総括班・総括班以外の計画研究

| 研究項目[1] | 課題番号 研究課題名 | 研究期間 | 研究代表者 氏名 | 所属研究機関・部局・職 | 人数 [2] |
|------------------------------|---|----------------------|-------------|--|-----------|
| X00 総 | 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 | 東京大学・大学院理学系研究科・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・放射化学基盤機構・准教授 | 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・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・研究員 | 3 |
| 計 | | 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、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

| 研究項目[1] | 課題番号 研究課題名 | 研究期間 | 研究代表者 氏名 | 所属研究機関・部局・職 | 人数 [2] |
|----------|--|---------------------|-------------|--|-----------|
| 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ーリーミング型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 |
| A01 公 | 21H00162 超伝導転移端検出器応用によるX A F S研究の飛躍的進展が拓く新 しい地球惑星科学 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 高橋 嘉夫 | 東京大学・理学系・教授 | 1 |
| A01 公 | 21H00164 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3年度 ～ 令和4年度 | 中村 信行 | 電気通信大学・教授 | 1 |
| A01 公 | 21H00165 革新レーザー技術で拓くエキゾチ ック物質の量子操作 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 桂川 眞幸 | 電気通信大学・情報理工・ 教授 | 1 |
| A01 公 | 21H00172 ミュオン原子におけるパリティ非 保存効果の観測に向けた動的過程 の研究 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 神田 聡太郎 | 高エネ加速器研・物質構 研・助教 | 1 |
| B01 公 | 21H00159 小惑星探査機はやぶさ2の回収試 料の負ミュオンによる炭素濃度 測定 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 中村 智樹 | 東北大学・理学系・教授 | 1 |
| B01 公 | 21H00176 ミュオン特性X線分析によるリチ ウムイオン電池内部の金属リチウ ムイメージング | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 梅垣 いづみ | 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 |

| | | | | | |
|---------------------|---|---------------------|--------|-----------------|---|
| B02 公 | 21H00160 荷電粒子の捕集・輸送装置の開発 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 奥津 賢一 | 東北大学・理学研究科・助教 | 1 |
| C01 公 | 21H00158 硬X線による化合物活性化を利用した新しいがん治療法の開拓 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 小川 美香子 | 北海道大学・薬学研・教授 | 1 |
| C01 公 | 21H00163 CdTe半導体検出器を用いたアルファ線放出核種At-211の生体内イメージング | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 桂川 美穂 | 東京大学・研究員 | 1 |
| C01 公 | 21H00166 高速半導体イメージャによる雷からのMeVガンマ線フラッシュの精密探査 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 中澤 知洋 | 名古屋大学・准教授 | 1 |
| C01 公 | 21H00169 微小胃がん腹膜播種の検出を可能とする放射線イメージング技術の開発 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 熊倉 嘉貴 | 埼玉医科大学・医学部・教授 | 1 |
| C01 公 | 21H00173 高時間分解能を実現する半導体検出器の開発と応用 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 中村 浩二 | 高エネ加速器研・素粒子研・助教 | 1 |
| C01 公 | 21H00175 脳病態時における中枢神経系リンパ管の免疫細胞応答イメージング | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 水間 広 | 理研・研究員 | 1 |
| D01 公 | 21H00161 多価イオンビームによる2光子稀崩壊の観測 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 山口 貴之 | 埼玉大学・理工学研究科・准教授 | 1 |
| D01 公 | 21H00167 高運動量ハドロンビーム反応測定のための粒子識別検出器の開発 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 白鳥 昂太郎 | 大阪大学・核物理研・助教 | 1 |
| D01 公 | 21H00174 実時間イメージ相関解析法によるパルス状ビーム利用実験の新展開 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 門野 良典 | 高エネ加速器研・物質構研・教授 | 1 |
| E01 公 | 21H00168 イオンビームを用いた高エネルギー光渦生成の基礎的研究 | 令和3年度 ～ 令和4年度 | 田中 実 | 大阪大学・理学系・助教 | 1 |
| 公募研究 計 34 件 (廃止を含む) | | | | | |

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

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 交付決定額

| 年度 | 合計 | 直接経費 | 間接経費 |
|----------|-----------------|-----------------|---------------|
| 平成 30 年度 | 253,006,000 円 | 194,620,000 円 | 58,386,000 円 |
| 令和元年度 | 293,670,000 円 | 225,900,000 円 | 67,770,000 円 |
| 令和 2 年度 | 299,520,000 円 | 230,400,000 円 | 69,120,000 円 |
| 令和 3 年度 | 299,520,000 円 | 230,400,000 円 | 69,120,000 円 |
| 令和 4 年度 | 265,460,000 円 | 204,200,000 円 | 61,260,000 円 |
| 合計 | 1,411,176,000 円 | 1,085,520,000 円 | 325,656,000 円 |

4 研究領域の目的及び概要

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

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的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実現した世界ではじめてのLi 金属の3D 非破壊元素分析実験がきっかけとなった。

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した。

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術分野において、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、軌道上に打ち上げ、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。

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。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

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

審査結果の所見では、

- (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。ガンマ線イメージング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**していただいた。

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**、という指摘もいただいた。

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た。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。

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**した。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全ての計画研究に対して中間評価の前に1回、最終年度に1回、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 |
| 8 | 2022年1月10日 | B02 | 酒井、高橋 (C01)、中村(A02) | 中部大学 |
| 9 | 2022年5月9日 | B03 | 酒井、高橋 (C01)、渡辺 (C01) | 理研 |
| 10 | 2022年5月16日 | A01 | 酒井、二宮 (B01)、上野 (B03) | 理研 |
| 11 | 2022年5月26日 | C02 | 酒井、高橋 (C01)、中村(A02) | J-PARC |
| 12 | 2022年6月7日 | B01 | 酒井、東 (A01)、能町(総括班) | J-PARC |
| 13 | 2022年6月22日 | A02 | 酒井、高橋 (C01)、Strasser (総括班) | 東北大学 |
| 14 | 2022年7月15日 | C01 | 酒井、東(A01)、中村(A02)、上野(B03) | IPMU |

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も、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はなく、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**に提案を行ない、認められ、領域研究期間の4年間にわたって継続的に実験を行うことができた。

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 Λnn 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 (2023年4月時点で53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、成功を収めており、中間評価では、**A+**という高い評価をいただいた。

【以下、非公開部分】 該当しない。

6 研究目的の達成度及び主な成果

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

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

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た。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、横展開をはかった。特に、C01 が進めた宇宙観測技術の医学研究への応用は医学・薬学の研究者との共同研究に発展し、様々な成果を生み出すことができた。

本領域から申請した J-PARC におけるミュオン共同利用 S1 型課題が採択され、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を実施することができた。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。B01 の非破壊元素分析実験は、C01 のもつ技術や C02 のビーム高度化の成果が展開された。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た。以下研究項目ごとに研究目的の達成度及び主な成果を記す。

A01 計画研究班 本計画班の目標は、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。このアプローチが有効であるという提案を論文化 (Phys. Rev. Lett. 126, 173001 (2021)) した。本領域内の C01, C02 班などとの横断的チームを組織し、J-PARC MUSE において、実際に希ガスネオン媒質中で生成したミュオンネオン (μNe) 原子を使って、ネオン原子核と負ミュオンという2体束縛量子系を用意し、高分解能超伝導カロリメータで放出されるミュオン X 線を高分解能測定して原理実証実験に成功した (Phys. Rev. Lett. 130 173001(2023)) (プレスリリース)。原子物理、基礎物理学に関連する目的を十二分に達成することができた。

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グネス、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った。大型加速器施設における研究は想定外のトラブルにより研究が遅れることがありえるが、国内外の研究拠点を駆使してトラブル時には互いのバックアップにする、ということが東日本大震災で学んだ教訓であった。COVID-19 という未曾有のトラブルのため JLab におけるハイペロンパズル解決に向けたハイパー核精密分光実験のビームタイムはまだ実施できていないが、トラブル前に収集したデータ、国内の研究拠点を駆使することで、想定外のトラブルに直接起因する研究の遅れ以外では、想定通りかそれ以上の成果を上げること成功し、国内外の研究拠点を駆使して想定外のトラブルの場合であっても成果を担保する、ということに成功した。

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、測定の精度向上による分析法の拡張と、宇宙観測用に開発された検出器のミュオン実験への適用実験を行った。具体的な達成目標として、J-PARC MUSE において先端的な非破壊元素分析研究を展開し、CdTe イメージャを用いた三次元元素分析法の実証、超伝導 TES カロリメータによる精密なミュオン特性 X 線測定の実証、10 mg 程度までの微少な試料への適用のための測定システム開発を行った。そしてこれらのシステムを用いることで、文化財の非破壊三次元元素分析と、貴重な炭素質隕石試料の分析への適用をはかった。6 台もの低エネルギー Ge 半導体検出器を備え、サンプルを空気にさらすことのない測定システムによる Ryugu からのサンプル分析は、初期分析チームの中で重要な役割を果たした。全体を通して当初の想定を上回る研究成果が得られた。

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 $d\mu + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu + 17.6 \text{ MeV}$ 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、原理実証を目指した研究を行なった。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こととした。i) ミュオン原子分子過程中の原子核反応 $t\mu + d \rightarrow {}^4\text{He} + n + \mu + 17.6 \text{ MeV}$ を四体問題として計算する計算法の開発を行った。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。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取得した。iii) 核融合反応後 (${}^4\text{He} + n + \mu + 17.6 \text{ MeV}$)、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。再生ミュオンと分子内核融合後に核融合性生物の α 粒子の原子軌道に捕まるミュオンの確率 (ミュオン捕獲率) を、原子核反応と反応の境界条件を正しく記述するチャネル結合理論に基づき精密に計算した。

B03 計画研究班 本計画研究の目標は、RI を用いた新たな物質科学研究手法を開拓するとともに、宇宙観測用ガンマ線検出器と組み合わせた領域横断による核物理研究へ応用することであった。目的達成に向け、RI プローブの性質解明及び関連研究を推進する①核プローブ研究チーム、RI 原子線共鳴装置の開発を担う②原子線発生系開発チーム及び③スピン選択磁石系開発チーム、その利用を視野に入れ本研究で測定対象とする試料の合成と評価、及び核プローブの利用研究を進める④物質科学研究チーム、および、領域内横断的連携により RI ビームや結晶を利用した新たな研究を開拓する⑤領域横断研究チームの 5 チーム体制で研究を推進してきた。①では新たな RI プローブとなる酸素 RI の核モーメント測定に成功し物性研究プローブとして利用できるようになった。また、その他の稀少 RI のモーメント測定や原子核構造に関する理論研究でも成果が得られた。②では、安定 Rb を用いた装置開発を進めた。目的の RI イオンを線形 Paul トラップにて捕集し、同時トラップする Sr をレーザー冷却することで共同冷却を引き起こし、低速化した上で中性ガスの導入により、RI を原子線として取り出すシステムを構築した。原子線の効率や収量など、定量的な性能評価に至らなかったが、トラップと引き出し制御、レーザー冷却、中性化などの要素開発では動作確認ができ、当該手法の完成に大きく近づいた。④では実際にスピン偏極 RI を用いた CuO や ZnO 単結晶の β -NMR 測定を実施し、当該手法の有用性を示すことができた。⑤では領域横断研究として、C01 計画班が長年開発を続けてきた CdTe 検出器を用いたコンプトンカメラを利用し、クーロン核励起反応実験と組み合わせて、脱励起ガンマ線の偏光度をコンプトン散乱から高精度に決定する原理実証実験を行った。理研のペレトロン加速器を用いて核スピン整列させた Fe からの脱励起ガンマ線を観測し、非常に高精度に偏光度を決定することができた。

C01 計画研究班 宇宙観測研究から生まれたセンサー技術、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、領域内の研究に対して横断的に検出器技術を適用すると共に、核医学、特にがん研究への加速的応用をはかった。最初に医学研究者の持つ課題の整理を行い、阪大医学部、東大薬学部、慶應大学医学部などの研究者と連携して小動物 RI 実験を行う体制を整えた。本研究グループが開発を続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を行った。シャーレ内の *in vitro* で $250 \mu\text{m}$ 程度の微小がん幹細胞塊を識別することにも成功するなど、最先端の成果が得られたこの技術を応用し、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 次元可視化実験をトモグラフィの手法で実施した。Ryugu サンプルの解析に X 線天文学のスペクトル解析の手法を導入、宇宙観測のために開発したコンプトンカメラを B02 班と共同で原子核からの偏光ガンマ線検出実験、公募研究 (A01-1, A01-5) と共同で行われた多価イオンからの偏光観測実験に適用するなど、当初計画していた以上の領域内への展開を果たすことができた。2019 年には研究成果を医療を中心とした各産業に展開することでイメージングの事業化をはかるために Kavli IPMU 発のスタートアップ iMAGINE-X 社を立ち上げた。

C02 計画研究班 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を行うことを目的に研究

をおこなった。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。マルチピンホール型のシャックハルトマン型検出器を構築し、ビームの位相空間分布の計測とフィードバックにより強度に加えエミッタンスも向上させた。さらに、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、領域全体のミュオン実験の環境整備を進めることができた。ii) ではトリチウムを用いたミュオン触媒核融合反応による負ミュオンビーム冷却の基本原則、具体的な装置設計、安全管理手順などを確立した。走査負ミュオン顕微鏡の設計が完了し、製作と実験の準備が完了した。トリチウムを用いない方法として導電性の曲面薄膜を用いた摩擦冷却器、および絶縁性の平面薄膜と分布電極の組み合わせによる摩擦冷却器を考案し、基本原則を確認した。

(2) 本研究領域により得られた成果

A01 計画研究 負ミュオンと超伝導 X 線カロリメータによって、基礎物理や原子物理はむろん、物性物理、宇宙物理、化学、核物理に及ぶ横断的研究成果が得られた。まず、 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た。強電場下の原子物理検証の新しいアプローチとしての本測定の成功の意義は大きい。この過程でミュオン X 線のみならず、ミュオン原子から放出される電子特性 X 線を精密に測定できることを見出した。金属媒質中のミュオン鉄 (μFe) 原子から放出される特徴的な広がりをもつ電子特性 X 線エネルギースペクトルから、ミュオン及び電子が関与する 10 フェムト (10^{-15}) 秒という短時間領域のダイナミクスが明らかになった (Phys. Rev. Lett. 127, 053001 (2021))。希ガス媒質中のミュオンアルゴン (μAr) 原子の電子特性 X 線測定からは、数個の束縛電子、負ミュオンおよび原子核で構成されるエキゾチック多価イオンという少数量子多体系を見出した。宇宙物理との接点という観点から、このエキゾチック多価イオンスペクトルと、「ひとみ」衛星が観測した宇宙プラズマ中の Fe イオンのスペクトルの比較から、脱励起過程や励起準位寿命を反映した相補的な情報が得られた。さらに、ミュオン原子だけでなく、ミュオン X 線に現れる振動構造によるミュオン分子の直接観測にも初めて成功した。すなわち重水素 D_2 固体標的中に、 $\text{dd}\mu$ というエキゾチック 2 原子分子イオンを生成した。 $\text{dd}\mu$ は、B02 および C02 計画班が取り組むミュオン触媒核融合の鍵となるエキゾチック分子である。振動スペクトルでは、ミュオンの質量を反映して物理化学理論におけるボルン・オッペンハイマー近似の破れが明瞭に観測され、少数量子多体系理論による精密計算の重要性を明らかにした。

公募研究 SPring-8 における TES による地球惑星科学試料の測定 (A01-4)、Si/CdTe コンプトンカメラによる多価重イオンの量子電磁力学効果の観測 (A01-1, A01-5)、ミュオニウムのライマンアルファ遷移 (122.09 nm) 遷移を用いた真空紫外・単一周波数・波長可変レーザー構築 (A01-6)、ミュオン原子におけるパリティ非保存遷移による標準模型検証 (A01-7) などの研究が実施された。特に A01-1 および引き続き行われた A01-5 では C01 と共同で「ひとみ」衛星のために開発した Si/CdTe コンプトンカメラを用いて 70 keV 前後の X 線偏光の高精度測定に成功し、Be-like イオンの 2 電子性再結合 X 線から全く予想されていなかった量子干渉の効果を発見した (Phys. Rev. Lett. 130, 113001 (2023))。

A02 計画研究 COVID-19 という未曾有のトラブルにより海外における研究が大きな影響を受ける一方、海外研究拠点 JLab、MAMI における既存のデータ、国内拠点 ELPH を駆使して、以下に述べる様に、数々の成果を上げた。1) 米国 JLab: ${}^3_{\Lambda}\text{n}$ ハイパー核 ($\text{nn}\Lambda$; 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、世界で初めて ${}^3_{\Lambda}\text{n}$ の生成断面積の上限値を得て、 $\text{nn}\Lambda$ 、 $\text{nn}\Sigma$ の共鳴状態のヒントを得ることに成功した。さらに、 Λ 、 Σ^0 ハイペロン、 η' 中間子の前方、low Q^2 の電磁生成断面積を得ることに初めて成功し、 Λn 相互作用の散乱長、有効長に関して重要な知見を得た。また、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なスペクトロメータ系の大型偏向電磁石を完成するという目標を達成し、JLab に無事輸出することができた。2) MAMI: 我々が原理実証を行なった「電磁生成したハイパー核等から生じる π^- 中間子を精密測定からハイパー核等の基底状態の質量を数 10 keV の高精度で決定する技術」を ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ (三重水素 Λ ハイパー核) の研究に適用すべく、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た。3) ELPH: $\gamma\text{d} \rightarrow \text{K}^+ \Lambda\text{n}$ 反応を用いて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た。開発を担当した大学院生の修士論文は KEK 測定器開発優秀修士論文賞を初めとして 8 件の受賞に繋がった。

公募研究 A02-1 班は $\gamma\text{d} \rightarrow \pi^+ \text{nn}$ 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

$d^2/d\Omega \pi/dM_m$ から nn 散乱長と有効距離が決定できることを示した。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に向けた試験基板の設計、製造を行った。

B01 計画研究 J-PARC MUSE におけるビーム特性を理解し、バックグラウンドを徹底的に抑える測定システムを設計した。これによりこれまでは数 g の試料にしか適用されていなかったミュオン元素分析を 10 mg までの微少な試料領域まで拡張した。炭素質隕石の分析に加えて、はやぶさ 2 の初期分析チームを領域横断的に組織し、**2020 年に地球にもたらされた小惑星リュウグウの石の分析を行った**。ミュオン元素分析は非破壊分析法であり、サンプル全体の特性を評価する唯一の方法として、上流の分析に位置付けられ、120 mg という非常に大量の試料を用い、はじめて**炭素、窒素、酸素といった生命に重要な元素のバルク組成を非破壊で明らかにする大きな成果を得た**。地球物質でほとんど汚染されていない地球外物質の組成が決定でき、今後太陽系の固体物質の組成の改訂につながる成果が得られたといえる。CdTe イメージャを用いた三次元元素分析法の開発では、2 mm 厚の CdTe イメージャを用いた可搬型装置を C01 班と共同で 4 台開発し、回転機構システムに組み込んだ。得られた複数の二次元の画像を、核医学診断で利用される SPECT の技術を応用して三次元画像化する手法を確立した。そして直径 1 cm 程度のプラスチックボールを用いて分析法の実証を行い、さらに江戸期に使用された金属加工用のるつぼの元素分析を行うことで、るつぼの主要元素の三次元組成を明らかにすることができた。この手法は今後、様々な考古物に対して適用が期待される。また A01 班と共同して超伝導 TES カロリメータを用いて標準試料の測定の他、隕石に対してもミュオン特性 X 線測定を行うことができた。

公募研究 B01-1 および引き続き行われた B01-3 班では、リュウグウ回収サンプルに近い炭素質隕石を用いて非破壊分析のフィージビリティの検討が行われた。模擬試料での軽元素検出に成功し、B01 班のもとに組織された領域横断チームとして、回収試料の管理、物理特性の測定を行い、実験を行なった。結果を初期分析チーム全体の解析結果と統合し、サイエンス誌への論文発表につなげた。

B02 計画研究 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**。また、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て、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。我々は精密四体系計算に基づき、調整パラメータなしにサイクル率の実験値を再現することに成功し、 $\text{IF}\mu\text{CF}$ の寄与を明らかにした。さらに $\text{D}\mu\text{CF}$ サイクルの鍵となるミュオン分子共鳴状態の崩壊に伴い放出される X 線の特徴的なエネルギースペクトルを予言した。A01, C02 班と共同でこの分子共鳴状態から放出される X 線スペクトルを TES を用いて世界で初めて検出した。精密測定結果は、この理論の予測と良い一致を得た。この測定により、 **$\text{D}\mu\text{CF}$ サイクルの存在を確立することに成功した**といえる。

標的開発研究では、ラバールノズルと衝撃波発生器を開発して干渉領域の形状や密度などの基礎データを取得し、目標であった 30 気圧を達成した。衝撃波発生装置の工夫を行い、発生装置と入射ミュオンビームや標的からの中性子との干渉を大幅に減少させることに成功した。C02 班と合同で、 μCF 素過程の直接観測のための実験装置を開発し、分子内核融合後に再び自由になるミュオン (再生ミュオン) の検出に世界で初めて成功した。厳密なチャネル結合理論による分子内核融合反応の計算により、再生ミュオンのエネルギー分布が 1 keV にピークをもつ非対称な分布を取ることを示した。また、理論と実験結果に食い違いがあったミュオン捕獲率を新たに計算し、実験値を見事に再現することができた。

公募研究 荷電粒子の捕集・輸送装置の開発(B02-1)が実施され、固体水素表面から真空中に荷電粒子を回収し輸送する必要のある計画研究(B02,C02)において鍵となる役割を果たした。電場を利用した同軸型輸送管がシミュレーションを基礎に開発され、超低速再生ミュオンの引き出しの成功に繋がった意義は大きい。

B03 計画研究 **新たな RI プロブとなる酸素 RI の核モーメント測定に成功し物性研究プロブとして利用できるようになった**。測定自体は遠不安定核領域においても展開し Cu-75 や Zr-99 の励起準位の測定を行い、成果を Nat. Phys. 15, 321 (2019) と Phys. Rev. Lett. 124, 112501 (2020) に発表した (それぞれプレスリリース)。原子核構造に関する理論研究を進め、成果を Nature 587, 66 (2020) や Nat. Commun. 13, 223410 (2022) に発表した。RI 原子線共鳴装置の開発では、**イオントラップ、冷却化、中性化を行うシステムの開発を行い、動作確認を行うことができた**。まだ効率の面で改善の余地を残すものの、原理的にはこれらを連動させて中性原子線を射出することができる段階に達した。物質科学研究として、結晶合成、特に高圧結晶合成や試料評価、および核プロブを用いた核化学研究

などでは多くの成果が得られた。B03 班は、分野横断的な研究展開が特長であったが、さらに C01 班との連携により偏光ガンマ線実験が核物理研究の新たな研究として始まった事も大きな成果である。

公募研究 電池材料研究のための高偏極酸素同位体ビーム開発(B03-1)が実施された。QST の HIMAC 加速器施設において、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って高偏極 (P-10%) かつ高強度な ^{19}O ビームを生成した。このビームを用いて、実際に、燃料電池電解質材料のイットリア安定化ジルコニア中 ^{19}O の β -NMR 観測に成功した。B03 班の目指す高偏極ビームの生成と物質科学研究への応用例として優れた成果が挙げられた。

C01 計画研究 CdTe イメージャとマルチピンホール光学系を用いてマウス咽頭部の微細組織への異なる RI 化合物の集積を、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。画像解析には、超新星残骸の X 線観測における高温プラズマの解析技法を適用した。本研究で示した複数の分子プローブを優れた空間分解能で同時に可視化できる能力は、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可能性につながるため極めて重要な成果である。本成果はメディカル系の雑誌に掲載され (Nature Biomedical Engineering 6, 640 (2022))、異分野融合の成果といえる。本計画研究で開発した成果が、近年、新たながんの放射線療法として注目されてアルファ線放出核種で標識した薬剤を用いた放射線内用療法への大きな貢献として注目されることとなった。本研究では CdTe 半導体の高いエネルギー分解能を生かし、RI の崩壊時に放出される 150 keV 以下の特性 X 線を用いたイメージングの研究を進めた。専用タングステンコリメーターを開発し、NIS 遺伝子導入がん細胞を用いた担がんマウスに ^{211}At -NaAt や ^{211}At で標識した薬剤を投与し、従来用いられていた SPECT 装置では判別できなかった腫瘍への ^{211}At の集積の可視化に成功した。この成果により、分担者の柳下が 2023 年度の日本癌学会の招待講演に選ばれるなど、成果が医学分野でも評価された。

公募研究 複数の医学・薬学分野の研究者による研究が行われた。具体的には、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 (C01-3)、超高分解能/多核種同時測定 *in vivo* イメージングのための分子プローブの開発 (C01-4)、硬 X 線による化合物活性化を利用した新しいがん治療法の開拓 (C01-5)、微小胃がん腹膜播種の検出技術の開発 (C01-8)、脳病態時における中枢神経系リンパ管の免疫細胞応答イメージング (C01-10) である。ほかに新しい応用として、多重散乱コンプトンカメラの感度向上と医療への展開 (C01-1)、TOF-PET に用いる半導体検出器 (C01-2)、アルファ線放出核種の生体内イメージング (C01-6)、Si ピクセル検出器によるガンマ線検出 (C01-7)、長時間分解能半導体検出器の開発 (C01-9) が行われた。特に C01-3,10 では、マウス髄腔内への放射性核種標識プローブの投与方法および撮影法を確立し、世界で初めてマウスの高精細な画像を取得することに成功した。

C02 計画研究 運動量方向に分散した負ミュオンビームを 2 つのスリットで空間的に切り出し、17-21 MeV/c について運動量分布の半値幅が 24-35 % であったものを 7% 程度に狭める事や 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。2 K まで冷却可能な極低温固体水素標的の実験装置を設置し、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 $p\mu$ 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、重水素層まで拡散輸送させ、標的からの中性子からミュオン触媒核融合反応を確認し、新規開発の同軸型輸送ラインにより超低速化ミュオンを引き出してターゲットからの Ti のミュオン X 線から超低速化ミュオンの放出を確認することに成功した。トリチウムを用いるビーム冷却装置を設計し、負ミュオンビームを径 $10\mu\text{m}$ に毎秒 30 個以上収束可能なことを示し、安全にトリチウムをハンドリングできる装置を設計制作した。トリチウムを用いずに収束負ミュオンビームを生成できる曲面薄膜摩擦冷却法と絶縁平面薄膜摩擦冷却法を新たに考案した。カプトン箔膜を用いて低速負ミュオンを生成し、同軸輸送管で 1.5m 超の長距離を輸送し、銀標的で負ミュオンを確認する実験を実施、低速負ミュオンの検出に成功した。7.5kV の電圧で毎秒約 60 個の収量を得ると共に、1kV という極めて低い電圧で検出に成功し、低速負ミュオンビームという新しい分野を切り開いた。

D、E 公募研究 D 班では領域横断研究として氷天体での物質の合成と蓄積(D-1)、リチウムイオン電池 (D-4)、 μSR のための実時間イメージ相関解析法 (D-7) の他、検出技術の開発として、 CaF_2 単結晶中の ^{57}Fe インビーム・メスバウアー(D-2)の他、リチウムドリフト型シリコン検出器の高性能化、多価イオンビームによる 2 光子稀崩壊の観測(D-5)、実時間イメージ相関解析法(D-7)、リングイメージングチェレンコフ検出器(RICH)の測定器技術(D-6)の研究が行われた。E 班は理論研究であり、イオンビームを用いた高エネルギー光渦生成の基礎的研究(E-1)が行われた。

【以下、非公開部分】
該当しない。

7 研究発表の状況

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

論文等は特に断りがない限り全て査読あり。筆頭著者が corresponding author の場合は*印なし。

【A01】計画研究

(雑誌)

- [1] T. Okumura et al., (including T. Azuma, Y. Ichinohe, Y. Kino, Y. Miyake, K. Ninomiya, S. Okada, T. Takahashi, S. Watanabe, S. Yamada), “Proof-of-Principle Experiment for Testing Strong-Field Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms: High Precision X-ray Spectroscopy of Muonic Neon”, Phys. Rev. Lett. 130, 173001 (2023). (プレスリリース「量子電磁力学をエキゾチック原子で検証 —ミュオン特性 X線エネルギーの精密測定に成功—」, 理化学研究所他共同プレスリリース, 2022年5月10日) (A01, B01, B02, C01, C02 研究項目横断成果)
- [2] T. Okumura et al., (including T. Azuma, Y. Ichinohe, Y. Kino, Y. Miyake, K. Ninomiya, S. Okada, T. Takahashi, S. Watanabe, S. Yamada), “De-excitation dynamics of muonic atoms revealed by high precision spectroscopy of electronic K X-rays using a superconducting TES detector”, Phys. Rev. Lett. 127, 053001(2021). Selected as Editors' Suggestion. (プレスリリース「最先端超伝導検出器で探るミュオン原子形成過程の全貌 —負ミュオン・電子・原子核の織り成すフェムト秒ダイナミクス—」, 理化学研究所他共同プレスリリース, 2021年7月26日) (A01, B01, B02, C01, C02 研究項目横断成果)
- [3] N. Paul, G. Bian, T. Azuma, S. Okada and P. Indelicato, “Testing Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms”, Phys. Rev. Lett. 126, 1730018(2021).
- [4] S. Okada et al., (including T. Azuma, Y. Ichinohe, Y. Kino, Y. Miyake, K. Ninomiya, T. Takahashi, S. Watanabe, S. Yamada), “X-ray spectroscopy of muonic atoms isolated in vacuum with transition edge sensors”, J. of Low Temp. Phys. 200, 445 (2020). (A01, B01, B02, C01, C02 研究項目横断成果)

(学会発表)

- [1] T. Okumura et al., “High-resolution spectroscopy of electronic K x rays from muonic atoms,” 20th International Conference on the Physics of Highly charged Ions (HCI2022), Matsue, Japan, Aug.29-Sep. 3, 2022.
- [2] S. Okada (invited), “Muonic atom X-ray spectroscopy for QED test in strong Coulomb field,” 20th International Conference on the Physics of Highly charged Ions (HCI2022), Matsue, Japan, Aug.29-Sep. 3, 2022.
- [3] S. Okada (invited), “Precision X-ray spectroscopy of muonic atoms to explore QED under strong electric fields,” High precision X-ray measurements 2021 (XPXM2021), Online (Frascati, Italy), Jun.8-10, 2021.
- [4] T. Okumura, “High resolution measurement of electronic K x rays from muonic atoms in metal,” Virtual International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2021), Online, Jul. 20-24, 2021.
- [5] T. Okumura et al., “X-ray spectroscopy of muonic atoms with superconducting detectors,” Applied Superconductivity Conference 2020 (ASC 2020), Online, Oct.24-Nov. 7, 2020.
- [6] 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.

(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] 東俊行, 日本量子医科学会第1回学術大会 一般市民講演会 講演「量子とはなにか、量子ビームとはなにか」, 2021年12月11日。
- [2] 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。

【A01】公募研究

(雑誌)

- [1] N. Nakamura et al., (including T. Takahashi, S. Watanabe, Y. Uchida, H. Watanabe, S. Watanabe, H. Yoneda, and N. Nakamura, “Strong polarization of a $J = 1/2$ to $1/2$ transition arising from unexpectedly large quantum interference,” Phys. Rev. Lett. 130, 113001 (2023). (プレスリリース「X線偏光で捉えた特異な量子干渉効果」, 電気通信大学他共同プレスリリース, 2023年3月17日) (A01, C01 研究項目横断成果)

【A02】計画研究

(雑誌)

- [1] 中村哲他「ラムダ粒子は、陽子と中性子を区別できるか?—ラムダハイパー核における荷電対称性の破れ」, 日本物理学会誌 77(5), 287-292 (2022).
- [2] B. Pandey et al., “Spectroscopic study of a possible Λ_{nn} resonance and a pair of Σ_{nn} states using the $(e, e'K^+)$ reaction with a tritium target,” Phys. Rev. C 105, L051001 (2022).
- [3] P. Achenbach et al., “The spectrometer and target systems for hypernuclear physics at the Mainz Microtron,” Nuclear Instrum.

Methods Phys. Res. A 1043, 167500 (2022)

[4] P. Eckert et al., “Systematic treatment of hypernuclear data and application to the hypertriton,” Rev. Mex. Fis. Suppl. 3, 0308069 (2022).

[5] S. N. Nakamura, “Future prospects of spectroscopic study of Lambda hypernuclei at JLab and J-PARC HIHR” EPJ Web Conf. 271, 11003 (2022).

[6] K. N. Suzuki et al., “The cross-section measurement for the $3\text{H}(\text{e}, \text{e}^+\text{K}^+)\text{nn}\Lambda$ reaction,” Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 013D01 (2022). (プレスリリース「電荷をもたない奇妙な原子核の高精度探索—ラムダ-中性子-中性子の三体系—」, 京都大学, 東北大学共同プレスリリース, 2022年3月8日)

[7] Y. Toyama et al. “Search for $\text{N}\Delta$ resonance state via the exclusive measurement of $\gamma\text{d} \rightarrow \text{d}\pi^+ \pi^-$ reaction,” Few-Body Syst. 63, 15 (2022)

[8] K. Itabashi et al. “Study of the $\text{nn}\Lambda$ state and Λn interaction at Jefferson Lab,” Few-Body Syst. 63, 16 (2022) (学会発表)

[1] S. Nagao et al., “Future prospects of hypernuclear high-resolution & high-precision spectroscopies with electron beams,” 3rd J-PARC HEF-ex WS (Tokai, Japan (J-PARC)), March 14–16, 2023.

[2] S. N. Nakamura et al., “Strangeness nuclear physics in the world and significance of research project at JLab,” Hypernuclear Physics Workshop 2023, (Newport News, VA, USA (JLab)), March 3, 2023.

[3] S. N. Nakamura (invited), “Precise spectroscopy of Λ hypernuclei with electron and meson beams,” 19th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure in memoriam Simon Eidelman (HADRON 2021), Mexico and Online, July 26–31, 2021.

[4] S. N. Nakamura (invited), “Challenge to the hyperon puzzle through high precision spectroscopy of Λ hypernuclei at the High Intensity High Resolution beamline,” International Workshop: Strangeness in Neutron Stars—Physics at J-PARC HIHR/K1.1 Beam Lines, Online, June 18, 2021.

(書籍)

[1] 中村哲, (パリテ編集委員会編) 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)

[1-4] S.N.Nakamura (School Chair), International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2022), 2022.10.24–27, Sendai, JAPAN; SNP School 2021, 2021.12.13–16, Osaka, JAPAN; SNP School 2020, 2020.12.2–5 Tokai, JAPAN; SNP School 2019, 2019.9.5–8, Sendai, JAPAN

(アウトリーチ活動)

[1] 中村哲, 荒川区自然科学フォーラム & 東京商工会議所荒川支部 特別講義「目で見えない極微の世界を視る」, 東京大学本郷キャンパス, 2022年7月9日.

[2] 中村哲, 「粒子加速器を駆使する現在の『錬金術師たち』が探る極微の世界」 ぶらりがく for ハイスクール, 東北大学 Youtube リアルタイム配信, 2021年3月27日.

(受賞)

[1-8] 木野量子, 第13回 KEK 測定器開発優秀修士論文賞, 2023/4/28; R.Kino, HUA Master’s Thesis Award, J-PARC Hadron Hall Users Association, March 22, 2023; R.Kino QE1 Special Award, GPPU Tohoku University, March 22, 2023; 木野量子, 令和4年度東北大学物理学専攻賞 2023/2/24; R.Kino CLUSHIQ2022, ANPhA Incentive Award, Nov. 1, 2022; R.Kino ANPhA 1st Prize and Hashimoto Prize, SNP School 2022, Oct. 27 2022; R.Kino Best presentation award, QBI2022, Sep. 26, 2022

[9] K. Itabashi, APFB Special Award, Yamada Conference LXXII, APFB2021, Kanazawa Japan, Mar. 2 2021.

[10] Y. Toyama, GPPU Excellent Student Award, Graduate Program on Physics for the Universe, Tohoku University, 2020.

【B01】計画研究

(雑誌)

[1] T. Osawa, S. Nagasawa, K. Ninomiya, T. Takahashi, T. Nakamura, T. Wada, A. Taniguchi, I. Umegaki, K. M. Kubo, K. Terada, I-H. Chiu, S. Takeda, M. Katsuragawa, T. Minami, S. Watanabe, T. Azuma, K. Mizumoto, G. Yoshida, S. Takeshita, M. Tampo, K. Shimomura, and Y. Miyake, “Development of nondestructive elemental analysis system for Hayabusa2 samples using muonic X-rays,” ACS Earth Space Chem. 7, 699–711 (2023). (B01, B01-1 B01-3, A01, C01, C02 研究項目横断成果)

[2] K. Ninomiya, M. Kajino, A. Nambu, M. Inagaki, T. Kudo, A. Sato, K. Terada, A. Shinohara, D. Tomono, Y. Kawashima, Y. Sakai, T. Takayama, “Non-destructive composition identification for mixtures of iron compounds using a chemical environmental effect on a muon capture process,” Bull. Chem. Soc. Jpn. 95(12), 1769–1774 (2022).

[3] I-H. Chiu, S. Takeda, M. Kajino, A. Shinohara, M. Katsuragawa, S. Nagasawa, R. Tomaru, G. Yabu, T. Takahashi, S. Watanabe, S. Takeshita, Y. Miyake, K. Ninomiya, “Non-destructive 3D imaging method using muonic X-rays and a CdTe double-sided strip detector,” Sci. Rep. 12, 5261 (2022). (B01, C01, C02 研究項目横断成果)

[4] T. Nakamura et al., (Y. Miyake, K. Ninomiya, T. Osawa, T. Takahashi, S. Takeda, S. Watanabe を含む), “Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples,” Science 379(6634), eabn8671 (2022). (B01, B01-1, B01-3, A01, C01, C02 研究項目横断成果)

[5] 齋藤努, 竹下聡史, 反保元伸, 土居内翔伍, 橋本亜紀子, 梅垣いづみ, 久保謙哉, 二宮和彦, 三宅康博, 「負ミューオンを用いた丁銀の色付に関する非破壊分析」, 文化財科学 84, 1–16 (2022).

[6] K. Kitazato, T. Osawa (101人中28番目) et al., “Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu,” Nat. Astron. 5, 246–250 (2021). DOI: 10.1038/s41550-020-01271-2.

[7] S. Yamamoto, K. Ninomiya, N. Kawamura, and Y. Hirano, “Optical imaging of muons,” Sci. Rep. 10, 20790 (2020).

(学会発表)

- [1] K. Ninomiya (invited lecture), “Muonic x-ray measurements,” The 6th Neutron and Muon School, December 14, 2022.
- [2] K. Ninomiya, “Non-destructive and position selective elemental analysis method using negative muon,” 43rd International Symposium on Archaeometry, Lisbon, Portugal, May 16–20, 2022.
- [3] K. Ninomiya (invited), “Application research using muons for archaeological samples,” Symposium on Quantum Sciences—Osaka University & Universität Hamburg, Online, March 8–10, 2022.
- [4] K. Ninomiya (invited lecture), “Non-destructive elemental analysis method using negative muon beam,” International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP School 2021), Hybrid (Osaka (RCNP, Osaka University) Japan), December 13–16, 2021.
- [5] 齋藤努 (招待講演), 竹下聡史, 反保元伸, 土居内翔伍, 橋本亜紀子, 梅垣いづみ, 久保謙哉, 二宮和彦, 三宅康博, 「負ミュオンを用いた歴史資料の非破壊元素分析」, 日本物理学会第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 18 日.
- [6] 大澤崇人 (基調講演), 「リュウグウ試料のミュオン特性 X 線分析」, 日本放射化学会第 66 回討論会 東京, 2022 年 9 月 15–17 日.
(アウトリーチ活動)

- [1] 日本放射化学会講演会パネルディスカッション, 2022.9.10 高橋嘉夫, 二宮和彦, 「放射化学が切り拓く人類の夢と安全安心: 『量子ビームを用いた小惑星リュウグウ・隕石試料の分析』」, , 福島県双葉郡広野町中央体育館
- [2] J-PARC オンライン講演会 (一般向け), 2021.8.25 二宮和彦, 「ミュオンで探る小惑星リュウグウからの石」
- [3] 新聞記事 2022.5.11 「三次元の元素分布を可視化」, しんぶん赤旗
- [4] 小惑星リュウグウ試料分析開始におけるオンラインの合同記者会見・見学会, KEK, 東北大学, 東京大学, 大阪大学, J-PARC センター, 2021.6.26

【B02】計画研究
(雑誌)

- [1] M. Kamimura, Y. Kino, T. Yamashita, Comprehensive study of muon-catalyzed nuclear reaction processes in the dtμ molecule, *Phys. Rev. C*, 107 (2023) 034607 (21 pages)
- [2] T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, S. Jonsell, P. Froelich, Near-threshold behavior of positronium-antihydrogen scattering cross sections, *Phys. Rev. A* 105 (2022) 052812. (Editor’s Suggestion)
- [3] T. Yamashita, Y. Kino, K. Okutsu, S. Okada, M. Sato, Roles of resonant muonic molecule in new kinetics and muon catalyzed fusion in compressed gas, *Scientific Reports*, 12 (2022), 6393 (14 pages). (Top 25-50 physics paper in 2022)
- [4] A. Iiyoshi, N. Kobayashi, T. Mutoh, S. Nakatani, S. Okada, M. Sato, Y. Tanahashi, N. Yamamoto, A. Fujita, Y. Kino, "A Safer, Smaller, Cleaner Subcritical Thorium Fission - Muonic Fusion Hybrid Reactor" *Fusion Sci. Technol.*, Accepted (2023)
- [5] T. Yamashita, Y. Kino, E. Hiyama, S. Jonsell, P. Froelich, Near-threshold production of antihydrogen positive ion in positronium-antihydrogen collision, *New Journal Physics (Fast track communications)*, 23 (2021) 012001-8 pages.
- [6] K. Okutsu, T. Yamashita, Y. Kino, S. Okada(7th), M. Sato(8th), Toshitaka Oka(9th), P. Strasser(13th, C02), Y. Nagatani(17th, C02), Y. Miyake(21th, C02), *et al.*, Design for detecting recycling muon after muon-catalyzed fusion reaction in solid hydrogen isotope target, *Fusion Engineering and Design*, 170 (2021) 112712-4 pages.
- [7] 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)
- [8] Relativistic corrections to the binding energy of positronic alkali-metal atoms, T. Yamashita, Y. Kino, *Phys. Rev. A*, **100** (2019) 062511(12 pages)
- [9] Coupled channel effects on resonance states of positronic alkali atom, T. Yamashita, Y. Kino, *Eur. Phys. J. D*, **72** (2018) 13(9 pages)
- [10] 山下琢磨, 木野康志, 陽電子原子の三粒子描像による高精度構造解析 II: 共鳴状態, *陽電子科学*, **16**(2021)11-21
- [11] 山下琢磨, 木野康志, 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, *陽電子科学*, **15**(2020)17-27 (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] Four-body treatment of antihydrogen atomic collisions, T. Yamashita, Y. Kino, *et al.*, Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific conference on Few-Body problems in Physics (APFB2020), Kanazawa, Japan, 2021/3/3 (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] Y. Ishibashi, A. Takamine (4th/23), H. Yamazaki (7th), H. Ueno (23th) *et al.*, “Nuclear magnetic moment of the neutron-rich nucleus ²¹O,” *Phys. Rev. C* **107**, 024306-1-7 (2023).
- [2] S. Iimura, A. Takamine (3th/37) *et al.*, “Study of the N=32 and N=34 shell gap for Ti and V by the first high-precision multireflection time-of-flight mass measurements at BigRIPS-SLOWRI,” *Phys. Rev. Lett.* **130**, 012501-1-6 (2023).
- [3] 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).

- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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]
- [8] 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]
- [9] 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) *et al.*, “Nuclear mass measurements with the new MRTOF-MS system at the ZeroDegree spectrometer of BigRIPS”, The 28th International Nuclear Physics Conference (INPC 2022), Cape Town, South Africa, September 11-16, 2022.
- [2] 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.
- [3] H. Ueno (invited), “Nuclear-physics research based on RI spin orientation technique,” XXXVI Mazurian Lakes Conference on Physics, Piaski, Poland September 1–7, 2019.
(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 一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ー」2019年1月30日(https://www.riken.jp/press/2019/20190130_2/)
(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] S. Nagasawa, T. Minami, S. Watanabe, T. Takahashi, "Wide-gap CdTe strip detectors for high-resolution imaging in hard X-rays," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 168175 (2023)
- [2] H. Fujii, K. Ohnuki, S. Takeda, M. Katsuragawa, A. Yagishita, G. Yabu, S. Watanabe, and T. Takahashi, "A Pure Tungsten Collimator Manufactured Using 3D Printing Technology for the Evaluation of 211At Radionuclide Therapy," *RADIOISOTOPES* **71**, 141-151 (2022). (物理学と医学融合)
- [3] A. Yagishita, S. Takeda, M. Katsuragawa, T. Kawamura, H. Matsumura, T. Orita, I.O. Umeda, G. Yabu, P. Caradonna, T. Takahashi, S. Watanabe, Y. Kanayama, H. Mizuma, K. Ohnuki, and H. Fujii, "Simultaneous visualization of multiple radionuclides in vivo," *Nature Biomedical Engineering* **6**, 640-647(2022) (物理学と医学融合)
- [4] G. Yabu, H. Yoneda, T. Orita, S. Takeda, P. Caradonna, T. Takahashi, S. Watanabe, and F. Moriyama, "Tomographic Imaging by a Si/CdTe Compton Camera for ¹¹¹In and ¹³¹I Radionuclides," *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences* (2021)
- [5] T. Orita, G. Yabu, H. Yoneda, S. Takeda, P. Caradonna, T. Takahashi, S. Watanabe, Y. Uchida, F. Moriyama, H. Sugawara, M. Uenomachi, K. Shimazoe, Double-photon emission imaging with high-resolution Si/CdTe Compton cameras, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1-1, (2021)
- [6] P. Caradonna, D. Reutens, T. Takahashi, S. Takeda, V. 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)
(学会発表)
- [1] T. Takahashi, "Toward new Frontiers: Encounters and synergies with state-of-the-art astronomical X-ray detectors", *SPIE Optics+Photonics*, 2022/08/21-25, San Diego, USA, (Invited, keynote talk)
- [2] S. Takeda, T. Orita, M. Katsuragawa, G. Yabu, R. Tomaru, A. Yagishita, I. O. Umeda, T. Takahashi, S. Watanabe, F. Moriyama, H. Sugawara, Y. Kanayama, H. Mizuma, K. Ohnuki, H. Fujii, L.R. Furenliid. "Development of an ultra-high-resolution multi-probe CdTe SPECT," 9th Conference on New Developments in Photodetection (NDIP20)",
- [3] 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

- [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
- [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 I 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)
- [2] 東京大学 (プレスリリース) 「宇宙観測技術で分子イメージングの新技术を開発! -医学生物学研究での応用へ-」, <https://www.ipmu.jp/ja/20220405-CdTe>, 2022 年 4 月 5 日
- [3] 東京大学・群馬大学共同 (プレスリリース) 「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>) 2019 年 7 月 24 日
(アウトリーチ活動)
- [1] 高橋忠幸, 宇宙 X 線観測装置を応用した次世代放射線内用療法のための新規核医学イメージングシステムの研究開発, Link-J イノベーションシリーズ vol.3, 2023 年 3 月 15 日
- [2] 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.
- [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. Shimada-Takaura, K. Ninomiya, A. Sato, N. Ueda, M. Tampo, S. Takeshita, I. Umegaki, Y. Miyake, and K. Takahashi, "A novel challenge of nondestructive analysis on OGATA Koan's sealed medicine by muonic X-ray analysis," J. Nat. Med. 75, 532-539 (2021).
- [2] 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
- [3] 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, 「負ミュオンビームを用いた歴史研究—ミュオンで見る 歴史資料—」, 原子力システム研究懇話会 第 317 回定例懇談会, オンライン開催 (日本原子力産業協会), 2022 /9 /20.
- [2] (招待講演) 三宅康博, 「ミュオン粒子を用いた顕微鏡の実現に向けて—自然科学と人文科学 —」, 第 58 回アイソトープ・放射線研究発表会, オンライン開催, 2021/7 /7.
- [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] 読売新聞 (朝刊), 「先端技術 壊さず分析 文化財再考 保存・活用へ」, 2022. 9.4.
- [2] 産経新聞, 「『洪庵の薬箱』 謎解きに挑む」, 2022.4.26.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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,
- [6] 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
- [7] 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 ~文理融合の試み~」, 2019.11.21,
- [8] 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
- [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—加速器が紡ぐ文理融合の地平—, 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
- [13] 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 ~文理融合プロジェクト」, 2019.2.12

8 研究組織の連携体制

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

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、これまでに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た。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分野の連携を図り、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。

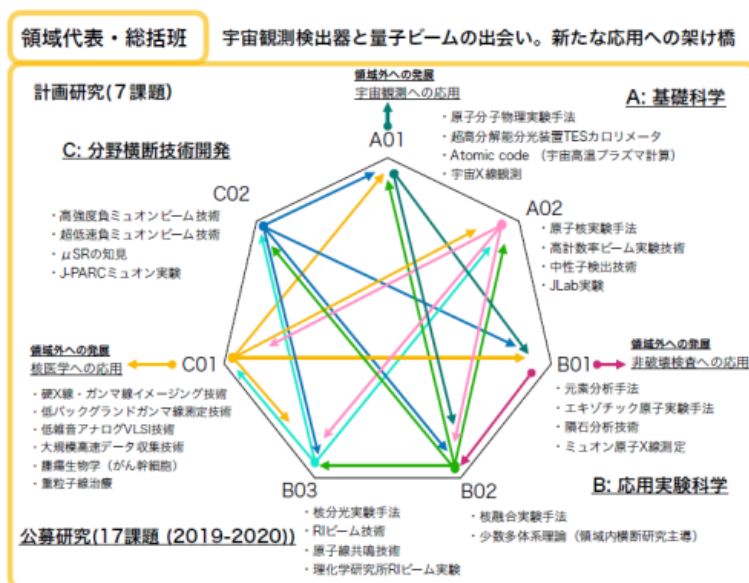
総括班は、各計画研究および公募研究の研究推進、連携の強化を行った。計画研究間の研究手法に関して協力関係を築き上げると同時に、領域全体の研究スケジュールの管理を実施した。定期的な班会議や若手の会を行い、分野横断的に自由な議論をする機会を提供した。本領域の成果についてのホームページを作成し、本領域の研究の進展、研究成果の解説、将来のビジョン等の一般への情報発信を行ってきた。国際的研究への展開を視野にいれ、国際活動を支援した。

| 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、世界に誇る技術を持ち寄り、異分野融合のスタイルで実験を行うことを目指した。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なかったため、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た。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し、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、本領域終了直後 2023 年 4 月より教授に昇任した。本領域が若手研究者の育成、および頭脳循環に大きく貢献している一例である。

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 ¹⁸⁶Re 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。



9 研究費の使用状況

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

計画研究では、まず、A01 班において 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り、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。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 イメージャの開発を B01 班と C01 班を中心に進めた。

2020 年以降は COVID-19 の影響により海外研究施設における研究が想定外の影響を受ける中、国際共同研究を積極的に展開していた本研究領域もその影響を大きく被った。特に米国 NIST において TES カロリメータを開発していた A01 班と、米国 JLab, ドイツ MAMI において電子ビームを用いたハイパー核分光実験を展開していた A02 班は、海外研究機関の研究者受け入れ制限により、現地における調整作業が遅れたため最終年度繰り越しを行い、海外拠点現地における開発・調整作業を進めた。

A02 班が実施した JLab 実験用大型荷電粒子分離電磁石の製作において、2018 年に設計の再検討を行う必要が生じたが 2018 年度予算の一部を繰り越し、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、もともとは別年度に製作する予定であった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、2 台の電磁石を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。その後、国内における励磁テストの後、2022 年に無事 JLab に輸送が完了した。

B01 班では 2019 年にミュオン分析チェンバー、2020 年に低エネルギー用 Ge 検出器の調達を行った。また、2021 年にはミュオン非破壊分析の標的として鐳を調達した。

B02 班では、2018 年に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、2019 年に風洞実験用計測システムを導入した。また、最終年度繰り越しを行い、 μ CF 実験のビームタイムの一部の実施が行う。

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を購入した。イオントラップシステムの評価過程において異音の挙動がシミュレーションと想定を超えて大きく食い違ったため、終年度繰り越しを実施し、イオントラップシステムの詳細な評価、検討による原因調査を進め、スピン選択系性能向上を進める。

C01 班では、医学研究者との交流や協働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 班ではシリコンドリフト検出器、ターボ分子ポンプセット、4K GM 冷凍機の調達を行った。J-PARC において、現時点ではトリチウムが扱えないという判断の元で、検討を進め、ミュオンの摩擦冷却という新しい技術を考案した。ただし、使用する薄膜の製造を短期的には企業が対応できないということが分かった。そのため、比較的厚い薄膜標的でも対応できる「収束減速」を用いることとし、それを実現するために最終年度繰り越しを行った。

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、

定期的に行われた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。2023年2月には新たな視点や手法による研究を共同で行なうことを目指し、日本物理学会 第77回年次大会 共催シンポジウムを行い、広く物理学・医学・地学・考古学など分野横断の応用に関する議論を展開した。宇宙、素粒子、原子核、量子コンピュータ、生命科学、医学の分野などの分野を牽引する研究者を一同に集め、異分野融合で課題解決の手法を探ること、そして新たな研究者ネットワークを形成することを目的として、国際会議 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023)を OIST、理化学研究所 iTHEMS、東京大学 Kavli IPMU と共催で開催した。国際若手スクールも5回共催した。コロナ禍という困難下であっても、現地参加とオンラインを組み合わせることで、海外学生の参加が増え、若手が議論し切磋琢磨する機会を失うことなく継続し、若手育成に大きく貢献することができた。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。また、事務局の事務業務、データ整理等を担当するアルバイトの雇用、領域会議の開催経費、計画研究ピアレビュー旅費、ニュースター印刷費等に使用した。東北大学 ELPH における検出器開発研究のためのビームタイムには、若手育成目的のため、大学院生はもちろん学部4年生も積極的にビームタイムに参加させるなど、座学では学べない実践的な研究・教育に努めた。

領域横断的な研究推進のための支援、横断的な技術開発を目的として総括班に予算を確保し、サポートした。J-PARC の負ミュオンビームを用いて行った実験では、A01, B01, B02, C01, C02 の連携研究のために、信号処理システムや実験のための特殊なチェンバー改修などに総括班が支援した。領域横断的に開発してきた物理実験用 FPGA ボードの標準 IP の整備をはかり、コンパクトなイメージング検出器への応用をはかった。広報活動としては、ホームページの維持を行い、本領域の研究成果をまとめた。また積極的にアウトリーチ活動を行なった。

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 氏や桂川美穂氏の A01 実験や B01 実験への参加、A02 班:A02 班で推進した原子核実験研究により学位を取得した外山裕一氏が、B02 班におけるミュオン実験の拠点である中部大学の特任助教に採用され、B02 班の実験研究の中核を担うようになったことなどが挙げられる。また C01 班では薬学研究者の梅田泉氏を異分野との連携を行うために雇用している。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

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

本新学術領域研究では、素粒子・核物理、加速器科学、物質・生命科学、理論・計算科学を内包する幅広い研究領域を宇宙観測検出器と先端量子ビーム技術をキーワードとしてまとめ上げ、異分野融合のアプローチで新たな研究領域を切り拓く努力を続けた。当初、ある分野における常識が他分野においては通用せず、共通の言葉すら見つからない程度にかけ離れた研究分野の研究者が、議論を重ね、共同で研究を進めるうちに相互理解を深め、当初の想定を超えた新しい研究成果が上がってくるのを目の当たりにすることができた。

領域研究を通じ、超伝導 X 線検出器と基礎物理への応用、ミュオン触媒核融合、高エネルギー光子や偏極 RI ビームを使ったハドロン物理や原子核物理、はやぶさ 2 の持ち帰った Ryugu サンプルの元素分析、医学研究での多核種同時生体内イメージングの実現と広い範囲の新しい研究を行った。ミュオン特性 X 線の精密分光による QED 効果の検証実験では 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) という極めて高い精度の測定を実現し、新しいアプローチを切り拓いたといえる。加えて、ミュオン原子に束縛された電子の状態が分光学的に観測され、固体中ミュオン原子におけるフェムト秒領域の電子ダイナミクスが明らかになり、希薄ガス中では宇宙プラズマにおける多価イオンと同様にエキゾチック多価イオンが生成されることを見出した。ミュオン分子はミュオン触媒核融合の要であるが、今までに誰も直接観測したことがなかった。これをミュオン特性 X 線による振動分光により初めて捉えることにも成功した。このように、超伝導 X 線検出器がいわゆるゲームチェンジャーの役割を果たして、新しいミュオン原子分子物理学が創成されたといえる。

負ミュオンを用いた非破壊元素分析では、極めて微小の隕石サンプルを解析する手法を確立した。医学研究においては、医学や薬学の研究者とチームを組み、CdTe 両面ストリップ検出器に最適化をはかって開発したコリメータを組み合わせ、さらに、X 線天文学のスペクトル解析技術を適用することで、従来装置では検出が難しい小動物の体内の微弱な集積の画像化が可能となった。この成果は、今後、がんなどの放射線内用療法における薬物動態の可視化に発展することが期待され、社会的インパクトも極めて高い。実際、製薬会社などとの共同研究が始まっている。このように、本領域研究において一見連携が見当たらない様々な分野の研究を「検出器」がつなぎ、異分野の研究者がそれぞれの実験や理論スタイルを持ち寄り、分野間のバリアを超えて進める融合研究の可能性を示すことができた。

領域研究を通じ、宇宙観測を目的に開発された検出器や解析技術が、異分野での問題解決につながると同時に、優れた検出器が様々な分野の発展をリードするというのを、改めて認識することができた。A01 班が開発した一連の超伝導 TES 型検出器は、J-PARC でのミュオン実験ばかりではなく、公募研究において SPring-8 における高精度の元素分析にも用いられ、その性能をいかに発揮した。C01 班では、領域横断的な利用を可能とするために、0.75mm 厚であった CdTe 両面ストリップ検出器を 2mm 厚とより高効率の厚型にすることに成功し、B01 計画研究の 3次元非破壊元素分析装置として、新規開発の可搬型ハウジングと共に採用された。さらに領域研究で開発した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の 3次元分布の可視化実験をトモグラフィの手法で実施した。Ryugu サンプルの解析には X 線天文学のスペクトル解析の手法が全面的に採用された。宇宙観測のために開発した Si および CdTe の半導体多層検出器によるコンプトンカメラが B03 班の原子核からの偏光ガンマ線検出実験や公募研究 (中村、電通大) の多価イオンからの偏光観測実験に用いられ、過去にない感度の X 線やガンマ線の画期的なイメージング偏光測定装置として機能することを示した。後者では、Be-like イオンの 2電子性再結合 X 線から全く予想されていなかった量子干渉の効果を発見した。このように当初計画していた以上の当該学問分野や関連学問分野への展開を果たすことができた。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

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

本新学術領域研究では、多くの若手研究者が研究遂行に関わり、非常に活発な頭脳循環、人的交流が進んだ。その例として、B01班の研究代表である二宮和彦(阪大助教→阪大准教授)、公募研究の代表の石川貴嗣(東北大助教→阪大教授)、本多良太郎(東北大助教→KEK准教授)、小高裕和(東大助教→阪大准教授)、山崎高幸(KEK)、梅垣いづみ(豊田中研→KEK助教)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→都立大助教)、A02: 外山裕一(東北大→中部大特任助教)、板橋浩介(東北大→東大特任研究員→QUP研究員)、B01: 邱奕寰(阪大→JAERI研究員)、B02: 奥津賢一(東北大→学習院大助教)、B03: 今村慧(理研→JASRI研究員)、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。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→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12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、

1) 若手ワードウェア研究会を初年度に実施した。

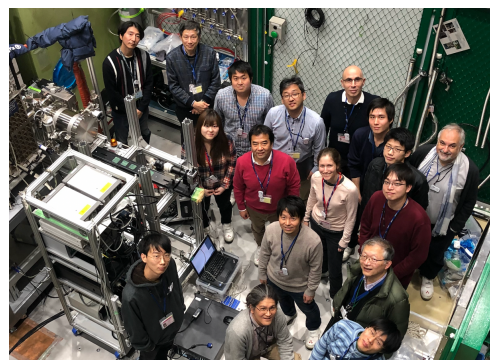
- 新学術領域 若手ハードウェア研究会 (2019年3月7-8日、大阪大学豊中キャンパス、参加者数30名)(量子ビームを用いた様々な研究に使われる検出器開発に携わる大学院生、学部生が、研究成果を発表し、情報交換、知識の幅を広げることを目的とした。実際に手を動かす演習も実施。)

国際若手スクールも5回、以下のように共催した。コロナ禍下にあっても現地参加とオンラインを組み合わせて開催することで、海外学生の参加が増え、コロナ禍という困難下であっても、若手が議論し切磋琢磨する機会を失うことなく継続し、若手育成に大きく貢献することができた。

- ストレンジネス核物理国際スクール SNP School 2019 (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)、 ストレンジネス核物理国際スクール SNP School 2020 (2020年12月2-5日、J-PARC東海、参加者数 現地参加22名+オンライン115名)、 ストレンジネス核物理国際スクール SNP School 2021 (2021年12月13-16日、大阪大学RCNP、参加者数 現地参加33名+オンライン93名)、 ストレンジネス核物理国際スクール SNP School 2022 (2022年10月24-28日、東北大学、参加者数 現地参加47名+オンライン128名)、 (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計22回開催した。

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。



J-PARCにおける負ミュオン実験参加者

【以下、非公開部分】該当しない。

12 総括班評価者による評価

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

総括班評価は、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 機構長

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 (東京大学大学院理学系研究科(理学部) 名誉教授)

日本の研究計画が陥りがちな、分野を固定した囲い込みの風習を打破し、学際分野間の交流を促進するだけでなく、複合分野を生み出してきたと評価する。そして、その中の、多くの試みが優れた成果を生み、国際的に高い評価を受けている。大変誇らしいことだ。本領域は、加速器や宇宙観測などで世界的に貢献してきたハードウェアを中心とした技術を、有機的に融合させ、新しい応用分野を国内外のグループと共に開拓している。この種のプロジェクトとしては異例の短時間の制約の中、可能な技術開発を選択し、成果を得ることに集中してきたことも特記すべきである。

大きな業績として評価したいのは、近未来に起きて欲しい研究体制の再編への道筋を示しつつあることだ。博士号取得者の就職の道が限られるのではとの心配も、世界的に活躍できる研究者を求める大学や企業が着実に増えていることで、かなり緩和された。

総括班

数多くの会合などを開くとともに、プレスリリースなどメディアへの働きかけをこまめに行ってきたことを、高く評価したい。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50回以上開催し、風通しの良い運営を心がけたと言える。

A01 中間評価時から飛躍的な進展を見せている。J-PARCでの実験で成果を上げている。狭いと思われてきた領域から、基礎物理全般の中心的トピクスへと飛び出し科学を飛躍させたと言える。

A02 大型スペクトルメータを製作し、米国JLABに設置している。今後の実験成果に期待したい。

B01 これまでのミュオン元素分析には数グラムの量が必要だったが、10 mg までの少量で分析可能なシステムが開発できている。小惑星探査衛星「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星 Ryugu の試料を、最初に非破壊分析した成果は、Science に発表されている。

B02 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プログラムが開発されている。

B03 放射性同位元素酸素の核モーメントを測り、Cu75 や Zr99 をプローブとして使えるようにし、Nature や Phys. Rev. Lett. などに取り上げられ、世界の注目を浴びた。

C01 高い空間分解能で、3核種同時に可視化することに成功し、診断と治療を一体化したラジオ・セラノスティクスに大きく貢献することができている。

C02 同軸輸送管を、ミュオン以外の荷電粒子の輸送する手法として特許申請した。

川合眞紀 (自然科学研究機構 機構長)

「量子ビーム応用」領域を総括する研究代表者の高橋忠幸博士の弛まない熱意溢れるリーダーシップは研究開始当初から陰ることなく、また、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異なる研究分野の参加者との間のコミュニケーションを密に取りながら、本領域の研究は進められた。領域研究の中核を成すのは、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ーおよび加速器実験用の可搬型センサーシステムである超伝導 TES 型カロリメータを用いる検出器で、X 線領域で数 eV という高いエネルギー分解能を有する分光技術である。

さらに、J-PARC を利用することで、強力な負ミュオンビームを引き出し試料に照射することで、対象とする試料から放出されるミュオン特性 X 線をプローブとした新しいミュオン原子分子物理学が創成された。負ミュオンを用いた J-PARC MUSE による実験は軽元素の定量分析に適応され、非破壊元素分析では、はやぶさ2の持ち帰った Ryugu サンプルに対して、微小隕石全体を反映する元素分析の情報を得ることができた。ミュオン特性 X 線をプローブとすることで、軽元素から重元素にわたり広い範囲を測定できる手法として今後の応用展開も楽しみである。

医学への応用展開も大いに進んだ。エネルギー分解能が良いことを利用して、多核種同時生体内イメージングに挑み、マウスの実験で異なる標的に対応するプローブ分子からのシグナルを識別して体内分布を示すことに成功している。医学応用をサポートするために、当該領域研究者がスピンアウトカンパニーを設立し、検出システムをテイラーメイドする体制も作られるなど、領域終了後の応用展開に向けての新たな一歩も踏み出している。

超伝導 X 線検出器がいわゆるゲームチェンジャーの役割を果たして、ミュオン特性 X 線を用いた原子・分子物理での新しい分野開拓がなされた。また、ミュオン特性 X 線を用いた元素分析手法の開拓、さらには、CdTe 半導体イメージャを用いた薬物動体などの医学分野への貢献や 原子核物理分野での新しい分野開拓を実現している。光子を使った原子核実験の新しい手法も生み出された。このように「量子ビーム応用」領域が当初夢を描いた新しい分野開拓を現実のものとした。領域終了後も、ますますの展開が期待できる成果である。

中野貴志 (大阪大学核物理研究センター センター長)

本領域は、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困難が予想される中、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することで、風通しの良い運営が実現した。その結果、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」が目指す姿が体現された。その好事例としていくつか成果を紹介する。

A01 班では、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 線の精密分光を超伝導 TES カロリメータを用いて実施した。重原子のミュオン原子エネルギー準位における QED 効果を世界で初めて実験的に明らかにすることを目的としたアプローチは、論文化され、実際に希ガスネオン媒質中で生成したミュオンネオン原子を用いた原理実証実験に成功した。B01 班は、負ミュオンによる元素分析法の発展のために、非破壊三次元元素分布の可視化、および高精度のスペクトロスコピー実験を実現した。これにより、超伝導 TES カロリメータによるミュオン特性 X 線測定を達成した。また、小惑星リュウグウの石の分析や文化財の非破壊三次元元素分析など、重要な研究進展も得られた。これらの成果はプレスリリースされ、大きな注目を集めた。C01 班では、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 C01 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、アスタチン-211 の高精度イメージングに世界で初めて成功した。アスタチン-211 を用いたアルファ線核医学治療は、難治性がんに対する新たな治療法として注目を集めており、今後の更なる発展が期待される。

以上のような優れた研究は、専門性の高い異分野が融合することにより初めて可能になったもので、本領域は、関連する分野の発展のみならず、新たな学際分野の創出に寄与している。本領域の設立による異分野融合の推進と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。