

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要  
〔令和5年度事後評価用〕

令和5年6月30日現在

機関番号：12601
領域設定期間：平成30年～令和4年
領域番号：6007
研究領域名（和文） 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。
研究領域名（英文） Toward new frontiers：Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beams
領域代表者
高橋 忠幸（たかはし ただゆき）
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授
研究者番号：50183851
交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,085,520,000円

研究成果の概要

本領域は、硬X線・ガンマ線イメージング技術、超高分解能X線分光技術など宇宙観測を目的に開発された革新的な先端検出器を、近年めざましい勢いで高強度化を果たした負ミュオンビーム、偏極RIビーム、高エネルギー光子ビームを用いた実験に応用すると共に、少数多体系理論を進展させ、過去に成し得なかったレベルの超精密科学研究を実現することを目指しておこなわれた。新たな視点や手法による研究を共同で行うことを目指し、広く医学・地学・考古学などとの異分野融合の研究を進めた。負ミュオンを用いたJ-PARC MUSEにおける実験は領域内の研究者が相互乗り入れしながら実験が行われた。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。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 $\mu\text{Ne}$ 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。さらに、先端検出器を用いた計測技術の医学研究への応用を進めた。医学や薬学の研究者とチームを組み、宇宙X線観測を目的に開発されたCdTe両面ストリップ検出器に最適化を図って開発されたコリメータを組み合わせ、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RIの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。量子ビームを用い、ハイパー核電磁生成法によるバリオン力のアイソスピン依存性や摩擦冷却による超低速ミュオン生成の研究も大きく進展した。

研究分野：量子ビーム関連科学，素粒子，原子核，宇宙線および宇宙物理に関連する実験，半導体，光物性および原子物理関連

キーワード：X線・ $\gamma$ 線測定，負ミュオンビーム

1. 研究開始当初の背景

本領域は、宇宙X線・ガンマ線観測のための最先端検出器の研究者が、負ミュオンビームを用いた加速器実験研究者という異分野の研究者に「出会った」ところに端を発する。宇宙観測検出器の技術を、高強度負ミュオンビームなどの量子ビームを用いた研究と結びつけ、新たな視点や手法による研究を共同で行うことを目的として本領域が立ち上がった。

2. 研究の目的

近年、加速器を用いて様々な高輝度量子ビームが作り出され、多彩な基礎科学研究が生み出されている。ところが、これらの研究は孤立して進められ、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付くことなく行われていることが多い。本領域では、宇宙X線・ガンマ線観測のために開発された最先端検出器技術と、負ミュオンビーム、高エネルギー光子ビーム、偏極を

付加した放射性同位元素(RI)ビームという、日本が国際的に極めて優位な位置にある三つの「エキゾチック」な量子ビームの研究を結び付け、新たな視点や手法による研究を共同で行う。これにより、それぞれの基礎科学分野の研究を深化させるばかりではなく、元素分析から医学に至る異分野融合による応用研究において新しい展開を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

最先端のエキゾチック量子ビームを用いた基礎科学研究から応用、さらにこれを支える技術開発の3つの研究分野をたてた。基礎科学に関する A01 原子分子と宇宙物理観測、A02 ハイパー核電磁分光、応用実験科学に関する B01 ミュオン非破壊分析、B02 ミュオン触媒核融合、B03 高偏極 RI ビームによる物質科学、そして分野横断技術開発の C01 宇宙光子検出器の異分野展開と C02 超低速ミュオンビームを合わせた3分野である。

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独立した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。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、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した。

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。「はやぶさ2」によってもたらされた Ryugu のリターンサンプルの非破壊元素分析では、B01、 C01、 C02 および公募研究が連携し、J-PARC の負ミュオンビームを用いて行った。B01 班が開発した、大気に晒すことができないサンプルを用いた実験のための特殊なチャンバーを継続的に使用するため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。

### 4. 研究の成果

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。

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」 負ミュオンと超伝導 X 線カロリメータによって、ミュオンネオン( $\mu\text{Ne}$ )原子からの  $5g \rightarrow 4f$  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 (図 1)。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、ミュオン鉄( $\mu\text{Fe}$ )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。希ガス媒質中のミュオンアルゴン原子( $\mu\text{Ar}$ )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

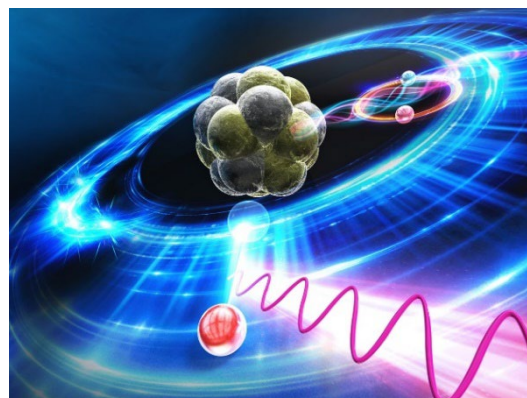


図 1: ミュオンネオン原子脱励起過程のダイナミクスイメージ図。赤い球で表すミュオンがネオン原子に捕獲されカスケード脱励起される際にミュオン特性 X 線(ピンク色の光線)が放出される様子を示している。

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。

A02「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」 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:  $^3\Lambda$  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、世界で初めて  $^3\Lambda$  の生成断面積の上限値を得て、 $nn\Lambda$ 、 $nn\Sigma$  の共鳴状態のヒントを得ることに成功した。さらに、 $\Lambda$ 、 $\Sigma^0$  ハイペロン、 $\eta'$  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、 $\Lambda n$  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  $\pi^-$  中間子の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  $^3\text{H}$  (三重水素  $\Lambda$  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:  $\gamma d \rightarrow K^+ \Lambda n$  反応を用いてバリオン間相互作用で最も基本的な  $\Lambda n$  間相互作用を調べる実験を進めた。

B01「負ミュオンビームを用いた新たな非破壊元素分析法」 負ミュオンによる元素分析法を進展させ、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 程度までの微量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「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」 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  $\mu\text{CF}$  に  $\text{IF}\mu\text{CF}$  サイクルを組み合わせて、核融合後に放出される  $^4\text{He}$  原子核による「加熱を利用しない」 $\text{D}\mu\text{CF}$  (Dual  $\mu\text{CF}$ ) サイクルが可能であることを見出した。これまで、実験値を再現するため物理的な根拠がない調整パラメータが使われていたが、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。TES を用いた精密測定結果は、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、干渉領域について形状や密度などの基礎データを取得する事に成功し、目標であった 30 気圧を達成した。さらに、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線との干渉を大幅に減少させることに成功した。

B03「高偏極 RI ビームの生成と核・物質科学研究への応用」 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。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、成果を発表した。RI 原子線共鳴装置の開発では、本研究によりイオントラップ、冷却化、中性化を行うシステムの開発を行うことができた。それぞれの機能に関して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、および核プローブを用いた核化学研究などでは多くの成果が得られた。

C01「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」 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、領域内の研究に対して横断的に検出器技術や解析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。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できる可能性につながるため極めて重要な成果である。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。タングステンを 3D プリントで印刷した専用の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  $^{211}\text{At}$ -NaAt や  $^{211}\text{At}$  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  $^{211}\text{At}$  の集積の可視化に成功した（図 2）。

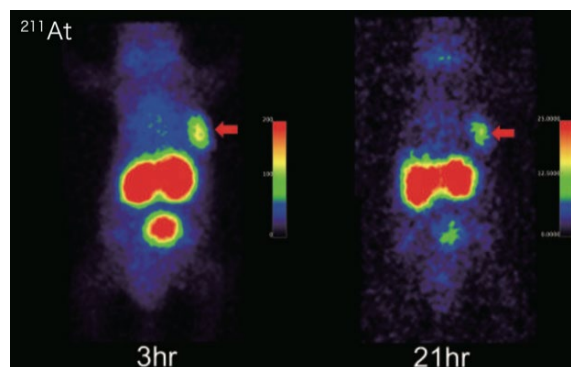


図 2: CdTe イメージャによる担がんマウスに投与した  $^{211}\text{At}$ -211 薬剤候補の分布。投与後 3 半減期を経過し、18.8kBq だった放射能が 1 桁近く減衰し、1.4kBq となった  $^{211}\text{At}$  のゼノグラフィへの集積(矢印)を確認した。

C02「最先端負ミュオンビーム開発」 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。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。

##### 5. 主な発表論文等（受賞等を含む）

- (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). (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. (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)
- (5) N. Nakamura et al., (including T. Takahashi, S. Watanabe, Y. Uchida, H. Watanabe, S. Watanabe, and H. Yoneda, "Strong polarization of a  $J = 1/2$  to  $1/2$  transition arising from unexpectedly large quantum interference," Phys. Rev. Lett. 130, 113001 (2023). (A01, C01 研究項目横断成果)
- (6) B. Pandey et al., "Spectroscopic study of a possible  $\Lambda$  nn resonance and a pair of  $\Sigma$  NN states using the  $(e, e'K^+)$  reaction with a tritium target," Phys. Rev. C 105, L051001 (2022). (A02)
- (7) P. Eckert et al., "Systematic treatment of hypernuclear data and application to the hypertriton," Rev. Mex. Fis. Suppl. 3, 0308069 (2022). (A02)
- (8) S. N. Nakamura, "Future prospects of spectroscopic study of Lambda hypernuclei at JLab

- and J-PARC HIHR” EPJ Web Conf. 271, 11003 (2022). (A02)
- (9) 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)
  - (10) 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)
  - (11) 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) (B02)
  - (12) 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) (B02)
  - (13) S. Iimura, A. Takamine (3<sup>th</sup>/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). (B03)
  - (14) F. Boulay, A. Takamine (6<sup>th</sup>/23), H. Ueno (45<sup>th</sup>), H. Yamazaki (46<sup>th</sup>) et al., “g-Factor of the <sup>99</sup>Zr (7/2<sup>+</sup>) isomer: Monopole evolution in shape coexisting region,” Phys. Rev. Lett. 124, 112501-1-6 (2020). (B03)
  - (15) H. Murayama, A. Yamamoto (8<sup>th</sup>/14) et al., “Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa<sub>2</sub>CuO<sub>4+δ</sub>,” Nat. Commun. 10, 3282-1-7 (2019). [Editors' Highlights] (B03)
  - (16) O. B. Tarasov, H. Ueno (28<sup>th</sup>/30) et al., “Discovery of <sup>60</sup>Ca and implications for the stability of <sup>70</sup>Ca,” Phys. Rev. Lett. 121, 022501-1-6 (2018). [Editors' Suggestion] (B03)
  - (17) 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) (C01)
  - (18) 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 <sup>211</sup>At Radionuclide Therapy,” RADIOISOTOPES 71, 141-151 (2022). (物理学と医学融合) (C01)
  - (19) 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) (C01)
  - (20) 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) (C02)
  - (21) 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 (C02)

(受賞)

- (1) 木野量子(A02, 東北大学) 第 13 回 KEK 測定器開発優秀修士論文賞
- (2) 三宅康博 (C02, KEK), 2022 年度 日本中間子科学会 功績賞, 2023 年 3 月 29 日
- (3) 邱 奕寰 (B01, 大阪大学), 2022 年度 日本中間子科学会 奨励賞, 2023 年 3 月 29 日
- (4) 梅垣いづみ(B01, KEK), 2022 年度 第 17 回日本物理学会 若手奨励賞, 2023 年 3 月 22 日
- (5) 都築豊 (C01, 東京大学) Young Scientist Best Presentation “Pierre Besson” Prize, the 9th Conference on New Developments in Photodetection (NDIP20) ,July 4-8, 2022
- (6) 山下琢磨 (B02, 東北大学), 2021 年度 日本陽電子科学会 奨励賞, 2021 年 12 月 10 日
- (7) 東 俊行(A01, 理研), 第 25 回松尾財団宅間宏記念学術賞, 2021 年 10 月 20 日.
- (8) K. Itabashi (A02, Tohoku Univ.) APFB Special Award of the Yamada Conference LXXII: The 8th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics, 2021/3/2.

ホームページ等

「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。」 ホームページ

[https://member.ipmu.jp/SpaceTech\\_to\\_QuantumBeam/index.html](https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/index.html)