

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H05457

研究課題名（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。

研究課題名（英文）Toward new frontiers: Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beams

研究代表者

高橋 忠幸 (Takahashi, Tadayuki)

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（研究期間全体）：（直接経費） 57,200,000円

研究成果の概要（和文）：超伝導X線検出器の基礎物理への応用、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、Ryugu 試料の非破壊元素分析、多核種同時生体内イメージングと広い範囲の新しい研究を行った。非破壊元素分析では微小の隕石サンプルの解析手法を確立した。ミュオン特性X線を用いたQED効果の検証実験では $\mu\text{Ne}$ からのミュオン特性 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）と極めて高い精度で測定した。医学や薬学の研究者とチームを組んだ研究を通じ、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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙観測を目的に開発された検出器技術が、異分野の問題解決につながると共に優れた検出器が様々な分野の発展をリードする事を示した。ミュオン分子共鳴状態はミュオン触媒核融合の要であるが、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成功した。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。医学研究においては、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。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。

研究成果の概要（英文）：We conducted new research in a wide range of areas: application of superconducting X-ray detectors to fundamental physics, muon-catalyzed fusion, hadron physics, and nuclear physics using high energy photons and polarized RI beams, non-destructive elemental analysis of Ryugu samples, and simultaneous multi-nuclide in vivo imaging. We established an analytical method for small meteorite samples in non-destructive elemental analysis. In the experiment to verify the QED effect using muon characteristic X-rays, we measured the absolute energy of muon characteristic X-rays from  $\mu\text{Ne}$  with an extremely high accuracy of 6298.8 eV (statistical error: 0.04 eV, systematic error: 0.26 eV). Through collaboration with medical and pharmaceutical researchers, we have succeeded in imaging weak RI accumulations in the bodies of small animals, which are difficult to detect with conventional equipment.

研究分野：宇宙物理実験

キーワード：量子ビーム 負ミュオン 硬X線・ガンマ線イメージング 超高分解能分光

## 1. 研究開始当初の背景

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。本新学術領域研究は、宇宙観測を目的に開発された革新的な先端検出器を、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ために立案された。

本領域は、基礎科学(A01、A02)、応用実験科学(B01、B02、B03)、分野横断技術開発(C01、C02)にわかれる。研究分野は、用いる量子ビームや、原子核、原子分子、物質などの対象とするものの違いによってさらに計画研究に細分化される。領域内で、複数の各計画研究が特に連携を行い、得られた知見がうまく循環するようにする。計画研究 B02 の代表者は、少数多体系を中心とした領域内横断の理論研究のとりまとめを兼ね、統一した概念のもとで、研究分野 A(基礎科学)と B(応用実験科学)が実施されるように考慮する。総括班に、若手の「技術開発調整」を置き、領域全体の技術向上をはかり、実施される技術開発の成果を領域内に展開する。本領域の特徴の一つに先端技術の異分野応用がある。計画研究 C01 から独自に開発したガンマ線イメージング技術を核医学研究へと展開する。その際、基礎医学研究や診療・治療の専門家も含めることにより、連携の強化を図る。B01 は、負ミュオンによる、新しい非破壊検査を広く展開し、ユーザを得る。また、C01 には、天文学における人工知能応用を進める研究者を配置し、急速に進む機械学習や深層学習の研究成果を領域内にとりこむこととする。

この領域研究の目的を達成するため、本総括班を組織することとなった。

## 2. 研究の目的

本研究は、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。」の総括班としての計画研究であり、全体の研究戦略を策定し、各計画研究の研究推進、連携の強化を通じて、7つの計画研究と関連する公募研究の進展を支援することを目的とする。総括班の活動を通じて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。定期的な班会議や領域会議、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する。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、研究成果等の情報発信を行う。国際的研究への展開を視野にいれ、国際活動を支援する。

本新学術領域研究では、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を、少数多体系の科学を理解するという観点で、共通する原理を理論的に見いだすことを目指す。一見、全くこれまで接点がなかった学術分野ではあるが、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。分野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。

本新学術領域研究では、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、宇宙観測を目的に開発された先端検出器を近年目覚ましい勢いで高強度化がはかられ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実験での研究を結びつけるとともに、広く医学・地学・考古学などの異分野融合の研究を進める。本研究成果取りまとめにおいては、得られた知見を課題と共に整理すると同時に、新たに生まれた研究テーマを今後いかに発展させるかを整理することを目的とする。

## 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その応用、さらにそ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あわせた3分野である。

全体の方針を定める総括班は領域代表を責任者とし、事務局担当をおいたうえで、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連携研究者として配置した。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

ならず、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。

総計 53 回の総括班会議を対面あるいはリモートで開催し、領域全体の研究、計画研究相互の設備共有、横断的な検出器開発の方針の確認及び調整を行った。特に、COVID-19 による制約が続いた期間中は、研究を如何に進めるか、国際協力をどのように進めるか知恵を出し合って解決策を探り、領域全体の運営をはかった。主催・共催、協催をあわせて研究会を 25 回開催した。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。2023 年 2 月には宇宙、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て開催することで、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。

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、それをう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。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、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、大気にさら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ェ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

### (1) 各研究課題の成果

**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、 $\mu\text{Ne}$  からの  $5g\ 4f$  遷移に伴うミュオン特性 X 線の絶対エネルギーを、 $6298.8\ \text{eV}$  (統計誤差  $0.04\ \text{eV}$ 、系統誤差  $0.26\ \text{eV}$ ) 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。金属媒質中の鉄ミュオン ( $\mu\text{Fe}$ ) 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  $10\ \text{フェムト}$  ( $10^{-15}$ ) 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  $\text{Fe}$  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。

**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:  $^3_\Lambda\text{n}$  ハイパー核 ( $nn$  ; 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、 $nn$ 、 $nn$  の共鳴状態のヒントを得ることに成功した。さらに、 $\Lambda$ 、 $s$   $^0$  ハイペロン、 $^0$  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となる**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  $^0$  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  $10\ \text{keV}$  の高精度で決定する技術」を  $^3_\Lambda\text{H}$  (三重水素 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:  $d K^+ n$  反応を用いてバリオン間相互作用で最も基本的な  $n$  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「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  $\mu$ CF に  $IF_{\mu}CF$  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」 $D_{\mu}CF$  (Dual  $\mu$ 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  $D_{\mu}CF$  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、 $D_{\mu}CF$  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。本研究して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。タングステンを用いた 3D プリンタ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  $^{211}At$ -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。

**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。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) 領域全体の研究成果

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。

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。

負ミュオンを用いた J-PARC MUSE によ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  $5g\ 4f$  遷移に伴うミュオン特性 X 線の絶対エネルギーを、 $6298.8\ \text{eV}$  (統計誤差  $0.04\ \text{eV}$ 、系統誤差  $0.26\ \text{eV}$ ) 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。ミュオン分子共鳴状態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。

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、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 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。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ことが、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、 $0.75\ \text{mm}$  厚であった CdTe 両面ストリップ検出器を  $2\ \text{mm}$  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。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okumura T., Azuma T., Bennett et al.	4. 巻 130
2. 論文標題 Proof-of-Principle Experiment for Testing Strong-Field Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms: High Precision X-Ray Spectroscopy of Muonic Neon	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevlett.130.173001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Nakamura T., Matsumoto M., Amano K. et al.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abn8671	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Osawa Takahito, Nagasawa Shunsaku, Ninomiya Kazuhiko, Takahashi Tadayuki et al.,	4. 巻 7
2. 論文標題 Development of Nondestructive Elemental Analysis System for Hayabusa2 Samples Using Muonic X-rays	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 699 ~ 711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.2c00303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Okumura Takuma, Azuma Toshiyuki, Bennett Douglas A., et al.,	4. 巻 31
2. 論文標題 Dynamical Response of Transition-Edge Sensor Microcalorimeters to a Pulsed Charged-Particle Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3067793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okumura T., Azuma T., Bennett et al.	4. 巻 127
2. 論文標題 Deexcitation Dynamics of Muonic Atoms Revealed by High-Precision Spectroscopy of Electronic <mml:math xmlns:mml="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="inline"><mml:mi>K</mml:mi></mml:math> X Rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.053001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuzuki Yutaka, Watanabe Shin, Oishi Shimpei, Nakamura Nobuyuki, Numadate Naoki, Odaka Hirokazu, Uchida Yuusuke, Yoneda Hiroki, Takahashi Tadayuki	4. 巻 92
2. 論文標題 An application of a Si/CdTe Compton camera for the polarization measurement of hard x rays from highly charged heavy ions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 063101 ~ 063101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0050826	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Okada S.et al.	4. 巻 200
2. 論文標題 X-ray Spectroscopy of Muonic Atoms Isolated in Vacuum with Transition Edge Sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 445 ~ 451
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02476-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okumura Takuma et al.	4. 巻 31
2. 論文標題 Dynamical Response of Transition-Edge Sensor Microcalorimeters to a Pulsed Charged-Particle Beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3067793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimada-Takaura Kayoko, Ninomiya Kazuhiko, Sato Akira, Ueda Naomi, Tampo Motonobu, Takeshita Soshi, Umegaki Izumi, Miyake Yasuhiro, Takahashi Kyoko	4. 巻 -
2. 論文標題 A novel challenge of nondestructive analysis on OGATA Koan's sealed medicine by muonic X-ray analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Natural Medicines	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11418-021-01487-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyake Yasuhiro et al.	4. 巻 21
2. 論文標題 J-PARC Muon Facility, MUSE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.21.011054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Shinji Okada
2. 発表標題 New Developments in Muon-Catalyzed Fusion Research by Precise X-ray Spectroscopy of Muonic Molecules
3. 学会等名 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidetoshi Azuma
2. 発表標題 Atomic, molecular and optical physics (AMO Physics): its diversity and specialty to bridge the gap between physics, biology and medical science
3. 学会等名 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 Toward new Frontiers: Encounters and synergies with state-of-the-art astronomical X-ray detectors
3. 学会等名 SPIE Optics+Photonics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋忠幸
2. 発表標題 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。
3. 学会等名 日本物理学会第 77 回年次大会 (共催シンポジウム) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 忠幸
2. 発表標題 宇宙X線ガンマ線検出技術を用いた新たな負ミュオン 実験の展開。原子物理から高精度3D非破壊元素分析まで。
3. 学会等名 KEKミュオン共同利用S1課題年次評価研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideki Ueno
2. 発表標題 Nuclear spectroscopy with spin-polarized RI beams
3. 学会等名 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2020 (SNP School 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三宅 康博
2. 発表標題 J-PARCにおけるミュオン非破壊分析
3. 学会等名 第3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– (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺 伸
2. 発表標題 CdTe半導体による高感度硬X線撮像分光検出器とミュオン非破壊分析への展開
3. 学会等名 第3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– (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadayuki Takahashi
2. 発表標題 The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation
3. 学会等名 The cosmos at high energies: exploring extreme physics through novel instrumentation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Azuma
2. 発表標題 Precise Spectroscopy of Atom/molecules and Astrophysics
3. 学会等名 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2019 (SNP School 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 量子ビームによる文理融合研究 -J-PARCにおけるミュオン非破壊分析-
3. 学会等名 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- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 青銅内部の非破壊元素分析と非破壊同位体分析の試み
3. 学会等名 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- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 ミュオンとは！ -ミュオンによる非破壊分析-
3. 学会等名 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- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 ミュオン分析法の新展開～同位体分析と化学状態分析～
3. 学会等名 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- (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東 俊行
2. 発表標題 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
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 哲
2. 発表標題 高エネルギー光子で探る原子核内部と中性子星深部
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二宮和彦
2. 発表標題 負ミュオンを用いた元素分析法の開発
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木野康志
2. 発表標題 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
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋忠幸
2. 発表標題 宇宙線工学的線・ガンマ線検出テクノロジーの異分野への展開
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三宅康博
2. 発表標題 最先端負ミュオンビーム開発
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡辺 伸
2. 発表標題 科学衛星開発における技術開発
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Patrick Strasser
2. 発表標題 Negative Muon Experiments in Thin Solid Hydrogen Film
3. 学会等名 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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋忠幸
2. 発表標題 Novel and interdisciplinary application of space hard X-ray and gamma-ray detectors
3. 学会等名 第 1 回量子線イメージング研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>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。  <a href="https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/index.html">https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/index.html</a>          新学術領域「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  <a href="https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/QuantumBeam201812/">https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/QuantumBeam201812/</a>          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。」若手ハードウェア研究会  <a href="https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/QBSeminar20190307/index.html">https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/QBSeminar20190307/index.html</a>          宇宙観測用CdTe検出器技術の異分野への展開  <a href="https://sites.google.com/view/iafcr-2019">https://sites.google.com/view/iafcr-2019</a></p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 哲  (Nakamura Satoshi)  (50280722)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授    (12601)	
研究分担者	東 俊行  (Azuma Toshiyuki)  (70212529)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員    (82401)	
研究分担者	木野 康志  (Kino Yasuhi)  (00272005)	東北大学・理学研究科・教授    (11301)	

## 6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	二宮 和彦 (Ninomiya Kazuhiko) (90512905)	大阪大学・放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センター・准教授 (14401)	
研究分担者	上野 秀樹 (Ueno Hideki) (50281118)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員 (82401)	
研究分担者	渡辺 伸 (Watanabe Shin) (60446599)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教 (82645)	
研究分担者	三宅 康博 (Miyake Yasuhiro) (80209882)	大学共同利用機関法人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 (82118)	
研究分担者	Patrick Strasser (Patrick Strasser) (20342834)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師 (82118)	
研究分担者	能町 正治 (Nomachi Masaharu) (90208299)	大阪大学・核物理研究センター・招へい教授 (14401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	酒井 英行 (Sakai Hideyuki)		

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計12件

国際研究集会 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISC02023) - Physics and Mathematics meet Medical Science -	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISC02023) - Physics and Mathematics meet Medical Science -	開催年 2023年～2023年
国際研究集会 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2020 (SNP School 2020)	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2019 (SNP School 2019)	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Workshop on “ the Cosmos at High Energies: Exploring Extreme Physics through Novel Instrumentation ”	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 IEEE NPSS International School for Real Time Systems 2019 (International School for Radiation Measurements)	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 Interdisciplinary approach of applying cutting-edge technologies at the frontier of cancer research	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2022 (SNP School 2022)	開催年 2022年～2022年
国際研究集会 The International School for Strangeness Nuclear Physics 2021 (SNP School 2021)	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 The 2nd Workshop on Quantum Beam Imaging (QB12019)	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 The 3rd Workshop on Quantum Beam Imaging (QB12021)	開催年 2021年～2021年
国際研究集会 The 4th Workshop on Quantum Beam Imaging (QB12022)	開催年 2022年～2022年

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------