

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：82401

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：18H05458

研究課題名(和文)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

研究課題名(英文)high-precision experiments in atomic and molecular physics using a negative muon beam and their astrophysical application

研究代表者

東 俊行(Azuma, Toshiyuki)

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

研究者番号：70212529

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 134,100,000円

研究成果の概要(和文)：強電場下の量子電磁力学(QED)検証の新しいアプローチとして、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X線の精密分光をめざした。J-PARCから供給される低速負ミュオンと超伝導TES型X線カロリメータを用いて、ミュオンNe原子から放出されるミュオンX線エネルギー準位に現れるQED効果の観測に成功した。同時に放出される電子特性X線を精密測定することで、束縛電子やミュオンと原子核で構成されるエキゾチックな少数量子多体系のフェムト秒時間領域のダイナミクスや分光の研究に応用できることも実証した。さらに、ミュオンX線に現れる振動構造を介してミュオン分子の直接観測にも初めて成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子電磁力学は、現在最も成功した物理理論の一つとされている。極限高電磁場下における理論検証を通じてその有効性と破れを見出すことが新しい物理の探求につながる。従来の手法にかわるアプローチを提案した今研究の意義は大きい。また、ミュオンX線は非破壊元素分析のツールとしても最近注目されている。本研究が確立したミュオン特性X線エネルギーの精密計測定法を元素分析法に応用することで、これまで困難であった同位体分析に加え、元素の化学状態分析など、新たな研究分野の開拓につながるが見込まれる。

研究成果の概要(英文)：As a new approach to verify quantum electrodynamics (QED) effects under strong electric fields, we aimed for high-precision measurements of muonic characteristic X-rays emitted from muonic atoms isolated in a vacuum. Using slow negative muons supplied at J-PARC and superconducting TES-type X-ray calorimeters, we have successfully observed the QED effect appearing in the energy levels of the muonic X-rays emitted from muonic Ne atoms. High-precision measurements of emitted electronic characteristic X-rays have also demonstrated their applicability to studying dynamics in the femtosecond time-domain and spectroscopy of exotic few-quantum many-body systems composed of bound electrons, muons, and nuclei. In addition, we succeeded for the first time in directly observing muon molecules via vibrational structures appearing in muonic X-rays.

研究分野：原子分子物理

キーワード：量子ビーム 負ミュオン 超伝導X線検出器 量子電磁力学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙観測のために開発が大きく進んだ超伝導 X 線マイクロカロリメータは、10keV 以下の X 線に対して数 eV の高分解能分光を可能とする。この革新的検出器技術を用いることで、地上で行う原子物理研究も大きく進展させられることが強く期待される。宇宙物理、原子物理など多彩な研究者のネットワークを作り議論をかわすことで、「出会い」によってもたらされる互いの研究技法があわさり、基礎科学研究ばかりではなく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の下、本領域研究はスタートした。そのなかで、本計画研究 A01 班では、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というテーマで研究を推進することを目指した。

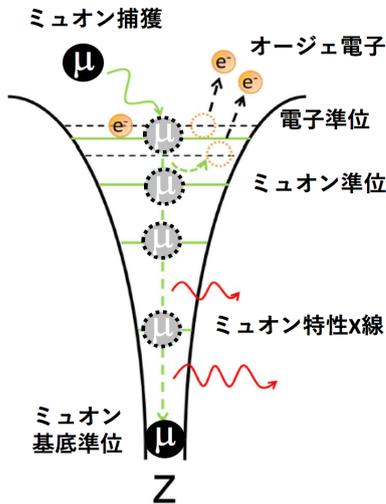


図1 ミュオン原子の生成過程

負電荷のミュオンは、質量が電子より 206.77 倍重いことと有限の寿命(崩壊寿命 2.2 マイクロ秒)をもつことを除けば、電子と全く同じ性質を持つ。従って負ミュオンと電子や原子核との相互作用は電磁力的なもので、それ以外の弱い相互作用は無視できる。一般に、負ミュオンが原子と出会うと、原子核の正電荷によって作られるクーロン力によって負ミュオンが束縛されるミュオン原子が生成される。このエキゾチックな原子は、負ミュオンの質量に起因して負ミュオン軌道のボーア半径が電子の 1/207 であり、かつ負ミュオン軌道の準位間エネルギーが電子の場合と比べて 207 倍である(つまり電子遷移に伴う特性 X 線に比べ 207 倍のエネルギーのミュオン特性 X 線を出す)という大きな特徴を備えている。図 1 に示すように、原子に負ミュオンが捕獲される際には、最初、高励起状態すなわち高い準位に捕獲される。その後、崩壊寿命よりずっと短い時間で次々と下の準位へ階段を駆け落ちるように脱励起してゆく。その際に、電子の場合に比べて 207 倍ものエネルギーを放出する。最初は、元々原子が持っていた束縛電子をオージェ電子として次々と弾き飛ばす。元素の Z が比較的小さい場合には、最終的には束縛電子をすべて剥離した負ミュオン

と原子核から構成されるミュオン原子、すなわちエキゾチックな水素様多価イオンが孤立して生成され、これが更に準位間遷移に伴ってミュオン X 線を次々と放出し最終的に基底準位に到達する。基底準位近傍に対応する負ミュオン軌道は原子核に極めて近づいたり或いは原子核内部に存在しているため、原子核物理の視点からは、同位体におけるアイソトープシフトを含めた有限の原子核の大きさや異方性を含めた原子核形状に極めて敏感なプローブとなりえる。従って負ミュオンの準位間遷移に伴って放出されるミュオン特性 X 線のエネルギー測定により、原子核の大きさや電荷分布が観測することができる。

このような原子物理学と原子核物理学の学際領域としてのミュオン原子の研究の歴史は、1950 年代にまで遡ることができる。しかしながら、実験的には生成される高速負ミュオンを減速することが難しいことから、固体標的やあるいは高濃度ガス標的にしか止めることが出来なかった。これでは、せっかく生成した多価ミュオン原子に再度まわりの原子から電子がすばやく供給されてしまう効果は無視できない。従って、本来精密分光には真空中に孤立したミュオン原子を用意することが必須であるにもかかわらず実現できなかった。さらに、利用された X 線検出器のエネルギー分解能の低さ( $\Delta E/E \sim 0.03$ )が克服できず、高分解能分光に用いられる古典的な手法である結晶分光器を導入するには、圧倒的な負ミュオンビーム強度不足が問題であった。その結果、それ以上の大きな進展がないままに数十年間研究が停滞してしているという状況判断があった。

一方で、岡田(計画研究 A01 分担)らは、宇宙 X 線観測用に開発が行われていた X 線マイクロカロリメータの加速器実験への応用に着目し、当時可搬型の多素子超伝導 TES (Transition-Edge Sensor) 型カロリメータの技術をほぼ確立していた米国の NIST(National Institute of Standards and Technology)との共同研究を平成 25 年より開始し、平成 28 年に TES を用いたパイ中間子原子 X 線分光を実現した。PSI(スイス)のパイ中間子ビームラインに、240 素子の TES カロリメータを可搬型断熱消磁冷凍機によって 50 mK まで冷却する装置を導入し、過酷な高強度 (1.5 MHz) ビーム環境下においても、高分解能 ( $< 7 \text{ eV FWHM @ } 6 \text{ keV}$ )と、高精度な絶対エネルギー較正(0.1eV 以下の中心値決定精度)を実現することで、エキゾチック原子の高分解能 X 線分光を実証した。引き続き、TES カロリメータを J-PARC において K 中間子ビームによる K 中間子分光実験に適用し成功させた。このように加速器実験用の TES カロリメータの開発はほぼ完成していた。

本計画研究 A01 班の研究代表者・東は、長年様々な新奇量子ビームを用いた研究に従事してきた。従来から放射線医学研究所 HIMAC やドイツ・重イオン科学研究所 GSI において、高エネルギー多価重イオンを結晶電場により準位選択的に電子励起させた際に放出される脱励起蛍光 X 線を観測してきた経験を有する。これより高電場下の QED 効果の検証の実験研究に取り組んできており、基礎物理検証のための精密分光は長年の研究テーマの中心の一つである。一方で、最近では、極低温静電型イオン蓄積リングを建設し、これに大型クラスターや生体分子をビームとして周回させた上で光励起や化学反応を起こさせるというユニークな量子ビーム研究を展開してきた。そのなかで、極低温下で動作するという意味で相性の良い超伝導カロリメータによって、分子の励起や反応の結果生成する中性フラグメント粒子を観測できるのではないかと着想し、岡田とともに検出器の導入を始めていた。また過去にミュオンビームを利用した経験があ

りミュオン科学の基礎知識を有していたために、最近 J-PARC を含め様々なミュオン施設の評価委員などを務めていたが、丁度、本領域申請のきっかけとなった高橋氏と三宅氏の共同研究によって実現した J-PARC での負ミュオンと宇宙観測検出器を組み合わせたイメージング実験の成功を知った。このとき、今までの経験や着想をすべて組み合わせた本計画研究こそが精密分光への全く別のアプローチとして拓けていることに思い至った。

## 2. 研究の目的

背景で述べられたミュオン X 線分光実験の停滞した状況が、X 線天文学分野において X 線観測衛星に搭載された高感度高分解能 X 線検出器の進展と東海村 J-PARC に建設されたミュオン科学実験施設の登場、すなわち、まさに「宇宙物理観測検出器と量子ビームの出会い」によって、状況が一変した。

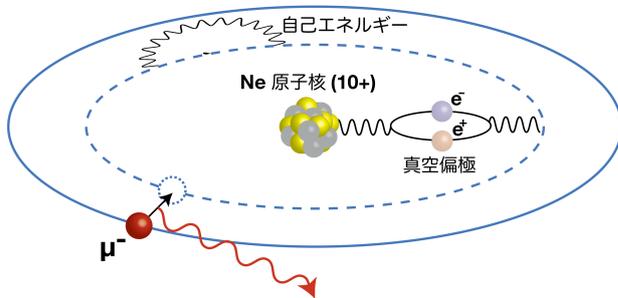


図2 ミュオン原子と量子電磁力学 (QED) 効果を示す概念図

世界最高強度の超低速大強度負ミュオンビームや数 keV(電子ボルト)の硬 X 線を、数 eV の高分解能で観測できる大面積超伝導カロリメータ検出器により、低エネルギーミュオンによる真空中での孤立ミュオン原子に対する高精度分光実験が可能となった。このような状況が実現されると、上述の原子核の大きさや形状に関するより精密な情報だけではなく、原子物理の観点からは負ミュオンは原子核の正電荷により人工では決して生成し得ないような超強電場に晒されるため、その結果、光子場と強く相互作用し、摂動的な理論手法では取り扱えない領域の極限高電場条件下での量子電磁力学(QED)効果という未踏の基礎物理領域を探求する理想のプロブとなりうる。加えて、エキゾチックな水素様多価イオンの生成に至るまでのオージェ電子や X 線放出を伴うカスケード脱励起過程は、エネルギーが束縛電子のみが関与する場合に比べて極めて大きいため高精度の測定が可能になる。ミュオン原子という系を用いて、宇宙物理における重元素からの X 線放出過程のモデル検証や高精度化に格好のベンチマークデータを供給するはずである。

よって、A01 班計画研究では、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を目的として掲げた。具体的にはミュオン原子を生成し、電子による特性 X 線の 207 倍もの高いエネルギーに現れるミュオン特性 X 線を、広帯域にわたり精密分光計測を行い、原子分子物理の理論計算と実験との検証を進めるとともに、検証の過程で得られた知見を発展させた新たな測定を、高精度 X 線分光観測など、宇宙物理観測へ展開することを目指した。これにより、**ミュオン原子というエキゾチックな水素様多価イオンの精密 X 線分光から、極限高電場条件下での量子電磁力学(QED)効果が、今までの精度を遥かに超えるレベルで検証されることが期待できる。**本計画研究は、研究領域全体のテーマ「宇宙観測測定器と量子ビームの出会い」の根幹をなす。基礎科学という面で他の研究班を強力に下支えする役割を果たしており、ミュオン触媒核融合といった応用実験も我々の実験技術、成果、さらに関与する理論研究が大きく貢献している。

## 3. 研究の方法

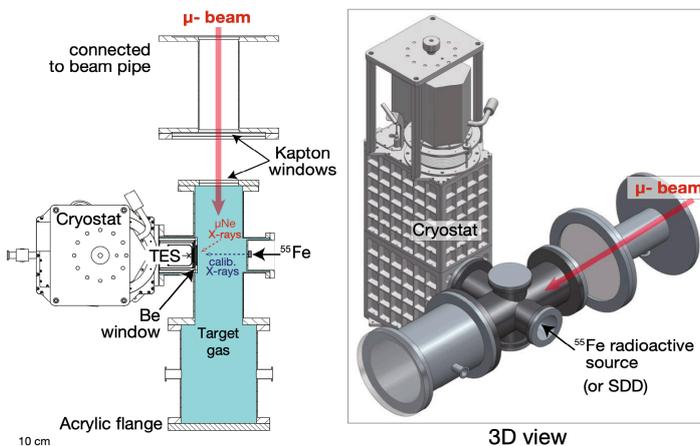


図3 実験装置配置図

世界最高強度の低速ミュオンビームが得られる茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン科学実験施設 (MUSE) D ラインで実験を行うことで、可能な限りミュオン原子の生成量を増大させた。使用した負ミュオンビームは 20MeV/c の低エネルギービームを利用した。低強度の放出 X 線でも十分な精度でエネルギーを決定するために、高感度・高分解能な X 線検出器である超伝導転移端 (TES) マイクロカロリメータを導入した。これによって目標とするミュオン X 線のみならず、脱励起の際にミュオン原子が放出する電子特性 X 線も観測した。後述のようにそのエネルギーは、X 線放出時のミュオン原子内の束縛電子の配置や数、さらにミュオン軌道などの状態を反映するため、電子特性 X 線のエネルギースペクトルを精密に測定でき

れば、ミュオン原子形成過程のダイナミクスや束縛電子配置の情報得られる。また標的は、Ne や Ar といった希ガスに加え、Fe フォイルといった固体標的も使用した。

## 4. 研究成果

### (1) ミュオン X 線測定による高電磁場下における量子電磁力学の検証

[Phys. Rev. Lett. 126 173001(2021)] [Phys. Rev. Lett. 130 173001(2023)]

希ガスであるネオン (Ne: 原子番号 10) 原子を標的として採用し、0.1 気圧という希薄な条件において、従来の半導体検出器よりも 10 倍以上高いエネルギー分解能を実現し (半値幅 5.2eV)、ミュオン Ne 原子が放出する 5g-4f および 5f-4d 遷移に伴う 6.3keV 付近のミュオン特性 X 線の測定に成功した。図 4 に示したピークは主に 6 種類の遷移によるミュオン特性 X 線が重なっているが、各々の寄与を考慮して解析を行い、ミュオン特性 X 線のエネルギーを 0.002% という極めて高い精度で決定した。

さらに、Ne ガス標的の圧力を変えながら同様の測定を繰り返した。ミュオン特性 X 線のエネルギーは、Ne ガス標的の圧力に依らず実験誤差の範囲内で一定であり、今回実験で用いたミュオン Ne 原子は、周囲の原子から電子を受け取ることなく、孤立した環境にあったと結論できた。最新の理論計算結果と実験結果を比較し、実験誤差の範囲内で両者が一致することを確かめた。特に今回の研究では、強電場下における真空分極の効果を 5.8% という極めて高い精度で検証することに成功した。これは、現在までに最も高精度で観測されたウラン多価イオン  $U^{91+}$  (原子番号 92) を用いた強電場 QED の検証精度に匹敵する。

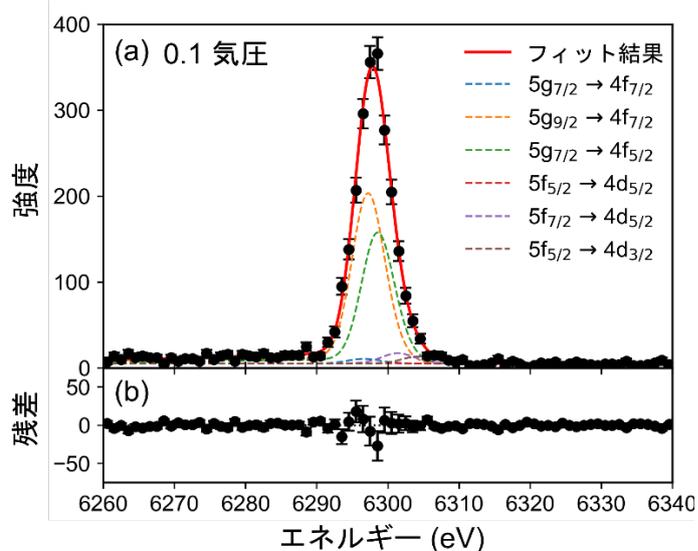


図 4 ミュオン Ne 原子から放出されるミュオン特性 X 線のスペクトル

(a) ネオンガス標的の圧力 0.1 気圧において、6300eV 付近に現れるミュオン特性 X 線を測定した。このピークは、6 種類の遷移の寄与の重ね合わせにより形成される。

(b) フィッティングによる残差 (予測値と実測値の差) を表す。

### (2) 電子特性 K X 線測定によるミュオン原子形成ダイナミクス

[Phys. Rev. Lett. 127 053001(2023) Editors' Suggestion]

図 1 に示したように、負ミュオンが原子に近づくと、負ミュオンは初め、原子の励起準位に捕獲される。続いて、原子内のたくさんの束縛電子を弾き飛ばしながら、励起準位から下の準位へ次々に脱励起する。

一方、ミュオン原子が孤立しない場合は、負ミュオンにより生じた原子内の空の電子軌道は、上の準位の束縛電子や負ミュオンの周囲の媒質に含まれる電子により再充填されてゆく。

ミュオン原子の形成では、負ミュオンや電子が関わるこれらの過程が、数十フェムト秒 (fs) という短い時間の間に立て続けに起こる。そのため、これまでミュオン原子形成過程のダイナミクスを捉える実験的手法は開発されておらず、具体的に負ミュオンがどのように移動し、それに伴い電子の配置や数がどのように変化していくのか、その全貌は分かっていた。我々は、鉄 (Fe: 原子番号 28) フォイルを固体標的として採用し、そこから放出される X 線を TES カロリメータで測定した結果、ミュオン Fe 原子から放出される電子特性  $K\alpha$  X 線、 $K\beta$  X 線のスペクトルが、それぞれ 200 eV 程度の広がりを持つ非対称な形状であることを突き止めた (図 5)。また、ハイパーサテライト ( $K^h\alpha$ ) X 線と呼ばれる電子基底準位に 2 個穴が空いている場合に放出される電子特性 X 線も観測した。

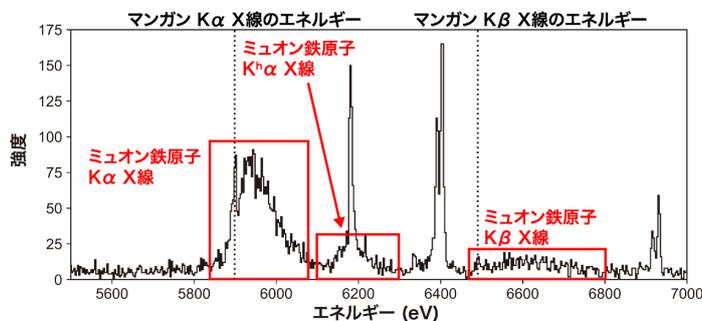


図 5 超伝導転移端マイクロカロリメータにより測定したミュオン鉄原子の X 線スペクトル

ミュオン鉄原子の電子特性 X 線は、鉄より原子番号が一つ小さいマンガ原子の電子特性 X 線のエネルギー位置に現れる。超伝導転移端マイクロカロリメータの高い分解能 (5.2 eV) により、ミュオン鉄原子からの電子特性 X 線のスペクトル ( $K\alpha$  X 線、 $K^h\alpha$  X 線、 $K\beta$  X 線) が 200 eV 程度の幅を持つ非対称なピークになることを明らかにした。

時々刻々と変化していく束縛電子や束縛ミュオンの状態により、電子特性 X 線のエネルギーが変化し、それらが重なり合った結果、電子特性 X 線のスペクトルは幅広い非対称な構造を形成する。ミュオン原子形成過程のダイナミクスを解明するために、多配置ディラック・フォック法により各時刻における電子特性 X 線エネルギーを計算し、電子特性 X 線スペクトルをシミュレーションした。実験結果の X 線スペクトルの形状とシミュレーション結果を照らし合わせたところ、ミュオンは鉄原子に捕獲された後、30 fs 程度でエネルギーの最も低い基底準位に到達することがわかった。具体的には、最初の 6 fs で鉄原子の全束縛電子 26 個のうち 7~8 個ほどは弾き飛ばされるが、周囲の鉄原子から比較的ゆっくりと再充填され、およそ 30 fs で元の状態に戻る。この再充填の速度は、実験結果との比較から  $0.35 \text{ fs}^{-1}$  である (つまり、ミュオ

ン鉄原子への電子移動が 2.9 fs に 1 回の割合で起こる) であることを突き止めた。

本研究では TES カロリメータを導入することで、固体中のミュオン Fe 原子から放出される電子特性 X 線のスペクトルを世界で初めて精密測定した。そして得られたスペクトル形状を手掛かりに、これまで未知であったミュオン原子形成過程の全貌を解明した。ミュオン原子形成過程は fs スケールの非常に速い現象であり、そのダイナミクスを捉えたのは本研究が初めてである。ミュオン原子をはじめとしたエキゾチックな量子少数多体系のダイナミクスという、新たな研究分野の開拓に貢献するものと期待される。

### (3) 電子特性 K X 線測定による少数電子が束縛した多価ミュオン原子の発見 [論文投稿準備中]

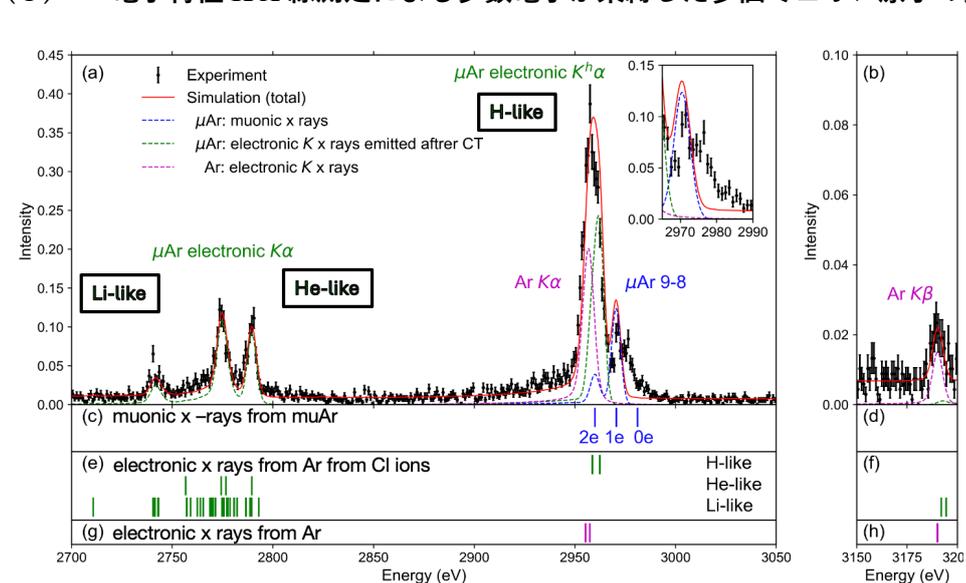


図6 観測された電子特性 X 線

水素様 (H-like) ヘリウム様 (He-like) リチウム様 (Li-like) Cl 原子から放出される電子特性 X 線に相当するエネルギーにピークが観測された。

その過程で束縛電子がすべて剥がされた後、周囲の Ar ガスから再び電子が移行して形成されたものであることが明らかになった。前述の Fe の場合と異なり、ミュオンの脱励起過程に比べてこの電子移行速度は遅いため、このエキゾチック多価イオン形成も遅く、ミュオンが原子核に吸収されるまで数 100 ns にわたって起こっている現象であることも判明した。したがって、観測された電子特性 X 線のピークのエネルギーは、前述の Fe の場合と異なり、Ar の原子核がミュオンによって完全に遮蔽されているため、Cl に対応する位置に観測された。

なお、宇宙物理との接点という観点からは、本研究で得られた He 様エキゾチック多価イオンスペクトルと、X 線衛星が観測対象としている宇宙プラズマ中の H 様、He 様 Fe イオンなどのスペクトルを比較することで、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ることが明らかになった。

### (4) ミュオン K X 線測定によるミュオン分子観測 [論文投稿準備中]

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。重水素 D<sub>2</sub> 固体標の中に、ddμ というエキゾチック 2 原子分子イオンを生成した。ddμ 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。TES カロリメータを用い、そのエネルギー分解能を生かして、ミュオン重水素原子 (dμ) からのおよそ 2.0 keV のピークの低エネルギー側に 400 eV 程度のエネルギー領域に分布するミュオン分子起因の特性 X 線を分離することに成功した。この X 線は、ミュオン分子の振動状態を反映した特徴的な構造をしており、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。

### (5) 高エネルギー対応の TES カロリメータの開発とその動作検証 [論文投稿準備中]

本計画研究では、研究開始時に所有していた 10 keV のエネルギーの X 線にまで対応する TES 検出器に加えて、100 keV 程度までが観測可能な TES を開発導入することを目標とした。新型コロナウイルスの感染拡大による影響などに伴って遅れが生じたが、最終的にはマイクロ波読み出しという多素子読み出しに対応した新しい読み出し回路を備えた 50keV までと 100keV までの X 線に対応した検出器を完成させた。大型断熱希釈冷凍機に搭載し、実際に J-PARC でミュオン X 線観測の実験を行い、ほぼ予定通りの性能を発揮することを確かめることができた。より重元素から放出されるミュオン X 線分光への道が切り開かれた。

### (6) まとめ

当初目標としていた負ミュオンと超伝導 X 線 TES カロリメータによって、原子物理に関連するミュオン原子を用いた量子電磁力学検証は十二分に達成することができた。加えて、本領域内の B02、C01、C02 班などとの横断的チームを組織し、物性物理、宇宙物理、化学、核物理におよぶ横断的研究成果が得られた。

さらに、ガス中の孤立標的としてアルゴン (Ar: 原子番号 18) を対象とし、ミュオン Ar 原子から放出される電子特性 X 線測定から、ミュオンや電子の配置やダイナミクスに関する情報を得た。その結果、数個の束縛電子、負ミュオン、および原子核で構成される少数量子多体系が形成されていることを見出した。この系は、原子核近傍に位置する負ミュオンによって原子核が遮蔽された H 様 (束縛電子 1 個)、He 様 (束縛電子 2 個)、Li 様 (束縛電子 3 個) 等のエキゾチック多価イオンとみなしうる。

理論シミュレーションから、これらはミュオンが基底準位にまで脱励起し、

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okumura T., Azuma T. 他41名	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 173001 ~ 173001
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 Tong X. M., Kato D., Okumura T., Okada S., Azuma T.	4. 巻 107
2. 論文標題 Electronic K x rays emitted from muonic atoms: An application of relativistic density-functional theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 012804-012804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.107.012804	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 Ichinohe Y., Yamada S., Hayakawa R., Okada S., Hashimoto T., Tatsuno H., Suda H., Okumura T.	4. 巻 209
2. 論文標題 Application of Deep Learning to the Evaluation of Goodness in the Waveform Processing of Transition-Edge Sensor Calorimeters	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1008 ~ 1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02719-7	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 Yan Daikang, Weber Joel C. 他24名	4. 巻 209
2. 論文標題 Absolute Energy Measurements with Superconducting Transition-Edge Sensors for Muonic X-ray Spectroscopy at 44 keV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 271 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-022-02860-3	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 Yan Daikang, Weber Joel, Morgan Kelsey, Wessels Abigail, Bennett Douglas, Pappas Christine, Mates John, Gard Johnathon, Becker Dan, Fowler Joseph, Swetz Daniel, Schmidt Dan, 他10名	4. 巻 31
2. 論文標題 Transition-Edge Sensor Optimization for Hard X-ray Applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3059972	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., Caradonna Pietro, Chiu I-Huan, Doriese W. Bertrand, Durkin Malcolm S., Fowler Joseph W., Gard Johnathon D., 他34名	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 Paul Nancy, Bian Guojie, Azuma Toshiyuki, Okada Shinji, Indelicato Paul	4. 巻 126
2. 論文標題 Testing Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 173001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.173001	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 Okumura T., Azuma T., Bennett D.A., Caradonna P., Chiu I., Doriese W.B., Durkin M.S., Fowler J.W., Gard J.D., Hashimoto T., Hayakawa R., Hilton G.C., Ichinohe Y., Indelicato P., 他33名	4. 巻 127
2. 論文標題 Deexcitation Dynamics of Muonic Atoms Revealed by High-Precision Spectroscopy of Electronic <math xmlns:mml="http://www.w3.org/1998/Math/MathML" display="inline"><math>K</math> X Rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 53001
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 該当する

1. 著者名 Okada S., Azuma T., Hashimoto T., Hayakawa R., Ichinohe Y., Indelicato P., Isobe T., Kanda S., Katsuragawa M., Kawamura N., Kino Y., Miyake Y., Ninomiya K., Noda H., Okumura T., Shimomura K., Strasser P., Takahashi T., Takeda S., Takeshita S., Tatsuno H., Ueno Y., Watanabe S., Yamada S., 他13名	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 Yamada S., Ichinohe Y., Tatsuno H., Hayakawa R., Suda H., Uruga T., Sekizawa O., Nitta K., Takahashi Y., Itai T., Suga H., Nagasawa M., Tanaka M., Kurisu M., Hashimoto T., Okada S., Okumura T., Azuma T., Isobe T., Kohjiro S., Noda H., 他21名	4. 巻 92
2. 論文標題 Broadband high-energy resolution hard x-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 013103 ~ 013103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0020642	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 Okada S., Azuma T., Hashimoto T., Hayakawa R., Ichinohe Y., Indelicato P., Isobe T., Kanda S., Katsuragawa M., Kawamura N., Kino Y., Miyake Y., Ninomiya K., Noda H., Okumura T., Shimomura K., Strasser P., Takahashi T., Takeda S., Takeshita S., Tatsuno H., Ueno Y., Watanabe S., Yamada S., 他13名	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 Yamada S., Tatsuno H., Okada S., Hashimoto T.	4. 巻 200
2. 論文標題 Coevolution of the Technology on Transition-Edge-Sensor Spectrometer and Its Application to Fundamental Science	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 418 ~ 427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02441-2	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 Hayakawa R., the HEATES collaboration, Yamada S., Tatsuno H., Fowler J. W., Swetz D. S., Bennett D. A., Durkin M., O'Neil G. C., Ullom J. N., Doriese W. B., Reintsema C. D., Gard J. D., Okada S., Hashimoto T., Ichinohe Y., Noda H., Hayashi T.	4. 巻 200
2. 論文標題 Waveform Analysis of a 240-Pixel TES Array for X-Rays and Charged Particles Using a Function of Triggering Neighboring Pixels	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 269 ~ 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02449-8	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 Tatsuno H., Bennett D. A., Doriese W. B., Durkin M. S., Fowler J. W., Gard J. D., Hashimoto T., Hayakawa R., Hayashi T., Hilton G. C., Ichinohe Y., Noda H., O'Neil G. C., Okada S., Reintsema C. D., Schmidt D. R., Swetz D. S., Ullom J. N., Yamada S., the J-PARC E62 Collaboration	4. 巻 200
2. 論文標題 Mitigating the Effects of Charged Particle Strikes on TES Arrays for Exotic Atom X-ray Experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 247 ~ 254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02484-5	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 Hashimoto T., J-PARC E62 collaboration, Bennett D. A., Doriese W. B., Durkin M. S., Fowler J. W., Gard J. D., Hayakawa R., Hayashi T., Hilton G. C., Ichinohe Y., Ishimoto S., Morgan K. M., Noda H., O'Neil G. C., Okada S., Reintsema C. D., Schmidt D. R., Suzuki S., Swetz D. S., Tatsuno H., Ullom J. N., Yamada S.	4. 巻 199
2. 論文標題 Integration of a TES-based X-ray spectrometer in a kaonic atom experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1018 ~ 1026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02434-1	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 Okada Shinji	4. 巻 56
2. 論文標題 Physics Experiments using Quantum Beams Pioneered by a Superconducting Transition-Edge Sensor Microcalorimeter Array	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 TEION KOGAKU (Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan)	6. 最初と最後の頁 65 ~ 72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2221/jcsj.56.65	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 Curceanu Catalina, Guaraldo Carlo, Iliescu Mihail, Cargnelli Michael, Hayano Ryugo, Marton Johann, Zmeskal Johann, Ishiwatari Tomoichi, Iwasaki Masa, Okada Shinji, Sirghi Diana Laura, Tatsuno Hideyuki	4. 巻 91
2. 論文標題 The modern era of light kaonic atom experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Physics	6. 最初と最後の頁 25006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/RevModPhys.91.025006	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

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 T. Okumura
2. 発表標題 High-resolution spectroscopy of electronic K x rays from muonic atoms
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly charged Ions (HCI2022) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Muonic atom X-ray spectroscopy for QED test in strong Coulomb field
3. 学会等名 20th International Conference on the Physics of Highly charged Ions (HCI2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. 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; Physics and Mathematics meet Medical Science (ISC02023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Azuma
2. 発表標題 De-excitation is exciting
3. 学会等名 36th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Azuma
2. 発表標題 De-excitation dynamics of muonic atoms revealed by high precision spectroscopy of electronic K x rays using superconducting TES microcalorimeters - an alternative approach to study highly charged ion dynamics -
3. 学会等名 Workshop on Atomic and Molecular Physics with Ion Beam at Inter University Accelerator Centre (IUAC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S.Okada
2. 発表標題 Accelerator-based physics experiments pioneered by superconducting TES microcalorimeters
3. 学会等名 Tsukuba Global Science Week 2021 (TGSW2021), Universe Evolution and Matter Origin program (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 P. Indelicato 他42名
2. 発表標題 Testing quantum electrodynamics in strong fields with exotic atoms
3. 学会等名 International Conference on Precision Physics and Fundamental Physical Constants (FFK2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okumura 他46名
2. 発表標題 High resolution measurement of electronic K x rays from muonic atoms in metal
3. 学会等名 Virtual International Conference on Photonic, Electronic and Atomic Collisions (ICPEAC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Yan 他26名
2. 発表標題 Transition-edge sensor microcalorimeter optimized for hard X-ray applications
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD-19) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Precision X-ray spectroscopy of muonic atoms to explore QED under strong electric fields
3. 学会等名 High precision X-ray measurements 2021 (XPXM2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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。新たな応用の架け橋。」第3回領域研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東俊行
2. 発表標題 TES 超伝導 X 線力ロリメータで探るミュオン原子形成過程と基礎物理
3. 学会等名 新学 術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」第 7 回領域研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東俊行
2. 発表標題 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-
3. 学会等名 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス 146 委員会 第 101 回研 究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村拓馬
2. 発表標題 超伝導転移端検出器で探るミュオン原子形成過程の電子ダイナミクス
3. 学会等名 物質科学 研究討論会:基礎と応用の新展開（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東俊行
2. 発表標題 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
3. 学会等名 2021 年度量子ビームサイ エンスフェスタ（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okumura
2. 発表標題 X-ray spectroscopy of muonic atoms with superconducting detectors
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村拓馬 他
2. 発表標題 超伝導検出器による金属内ミュオンからの電子特性 X 線の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村拓馬
2. 発表標題 超伝導検出器による金属内ミュオンから放出される電子特性 X 線の高分解能分光
3. 学会等名 原子衝突学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村拓馬 他
2. 発表標題 超伝導検出器を用いたミュオニック X 線の高分解能分光による量子電磁力学の検証
3. 学会等名 原子衝突学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村拓馬 他
2. 発表標題 超伝導転移端マイクロカロリメータを利用したミュオン原子の高分解能X線分光
3. 学会等名 電気学会研究会「周波数精密計測とその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須田博貴 他
2. 発表標題 超伝導転移端 X 線検出器の技術成熟化と地球外試料分析に向けた SPring-8 実験
3. 学会等名 日本天文学会 2020 年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田信二 他
2. 発表標題 超伝導検出器を用いたミュオンネオン原子の精密 X 線分光
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田信二 他
2. 発表標題 超伝導転移端センサーが拓く量子ビーム実験
3. 学会等名 東北大学 素粒子・核物理学講座セミナー・新学術領域研究「量子ビーム応用」セミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田信二 他
2. 発表標題 超伝導検出器を用いたミュオン原子分子精密X線分光
3. 学会等名 第 11 回 Muon 科学と加速器研究
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡田信二
2. 発表標題 超伝導 X 線検出器が拓くミュオンビーム実験
3. 学会等名 2020 年度 量子ビームサイエンスフェスタ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東俊行
2. 発表標題 TES超伝導X線検出器が切り拓くミュオンビーム元素分析の展望
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 T. Azuma
2. 発表標題 High precision spectroscopy and dynamics of atom/molecules related with astrophysics
3. 学会等名 IPMU workshop “The cosmos at high energies” (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田信二
2. 発表標題 TESカロリメータで迫る高分解能ミュオン原子分光
3. 学会等名 新学術領域「クラスター階層」と「量子ビーム応用」合同検出器ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村拓馬, 東俊行(2nd/37), 一戸悠人(12th/37), 岡田信二(24th/37), 渡辺伸(36th/37), 山田真也 (37th/37) その他
2. 発表標題 超伝導検出器を用いたミュオン原子の高分解能 X 線分光
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 Muonic Atom Experiment with Microcalorimeter at J-PARC
3. 学会等名 16th SPARC (Stored Particles Atomic Research Collaboration) Topical Workshop (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田信二
2. 発表標題 多素子超伝導転移端センサーが拓く量子ビームを用いた物理学実験
3. 学会等名 日本学術振興会超伝導エレクトロニクス146委員会 第15回センシングシステム分科会/第18回通信・情報処理分科会 合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Okada
2. 発表標題 X-ray spectroscopy of muonic atoms isolated in vacuum with transition edge sensors
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors (LTD18) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田信二
2. 発表標題 Toward new frontiers : Encounter and synergy of state-of-the-art astronomical detectors and exotic quantum beam
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東俊行
2. 発表標題 Precision measurements in atomic and molecular physics using a negative muon beam and its application to observations in astrophysics
3. 学会等名 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。」第1回領域全体会議 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東俊行
2. 発表標題 孤立した多価ミュオン原子/イオンの精密X線分光に向けて
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 (同志社大学)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Okada and T. Azuma
2. 発表標題 Toward Experiments on Highly-charged Muonic Atom/ion Formation and Muon Transfer Process at J-PARC
3. 学会等名 19th International Conference Physics of Highly Charged Ions (Lisbon, Portugal) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Azuma
2. 発表標題 Superconducting TES calorimeter for atomic and molecular physics
3. 学会等名 International Workshop on Atomic and Molecular Collisions (Udaipur, India) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>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。」  <a href="https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/planned-research/a01/index.html">https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/planned-research/a01/index.html</a>          理研開拓研究本部 東原子分子物理研究室  <a href="https://www.riken.jp/research/labs/chief/atom_mol_opt_phys/index.html">https://www.riken.jp/research/labs/chief/atom_mol_opt_phys/index.html</a> &amp; <a href="https://amo.riken.jp">https://amo.riken.jp</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	一戸 悠人  (Ichinohe Yuto)  (30792519)	立教大学・理学部・助教    (32686)	

## 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	山田 真也 (Yamada Shinya)  (40612073)	立教大学・理学部・准教授  (32686)	
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	馬場 彩 (Baba Aya)  (70392082)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授  (12601)	
研究分担者	井上 芳幸 (Inoue Yoshiyuki)  (70733989)	大阪大学・理学研究科・准教授  (14401)	
研究分担者	池戸 豊 (Ikedo Yutaka)  (90415050)	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・前任技師  (82118)	
研究分担者	岡田 信二 (Okada Shinji)  (70391901)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・協力研究員  (82401)	

	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	高橋 忠幸 (Takahashi Tadayuki)  (50183851)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授  (12601)	

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
研究協力者	木野 康志  (Kino Yasushi)  (00272005)	東北大学・理学研究科・教授    (11301)	
研究協力者	二宮 和彦  (Ninomiya Kazuhiko)  (90512905)	広島大学・自然科学研究支援開発センター・教授    (15401)	

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0件

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			
フランス	カスラー・プロセス研究所			