

## PRESS RELEASE

2023年5月10日

理化学研究所、日本原子力研究開発機構、東京都立大学  
立教大学、カスラー・ブロッセル研究所  
東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構  
高エネルギー加速器研究機構、J-PARC センター、中部大学

## 量子電磁力学をエキゾチック原子で検証

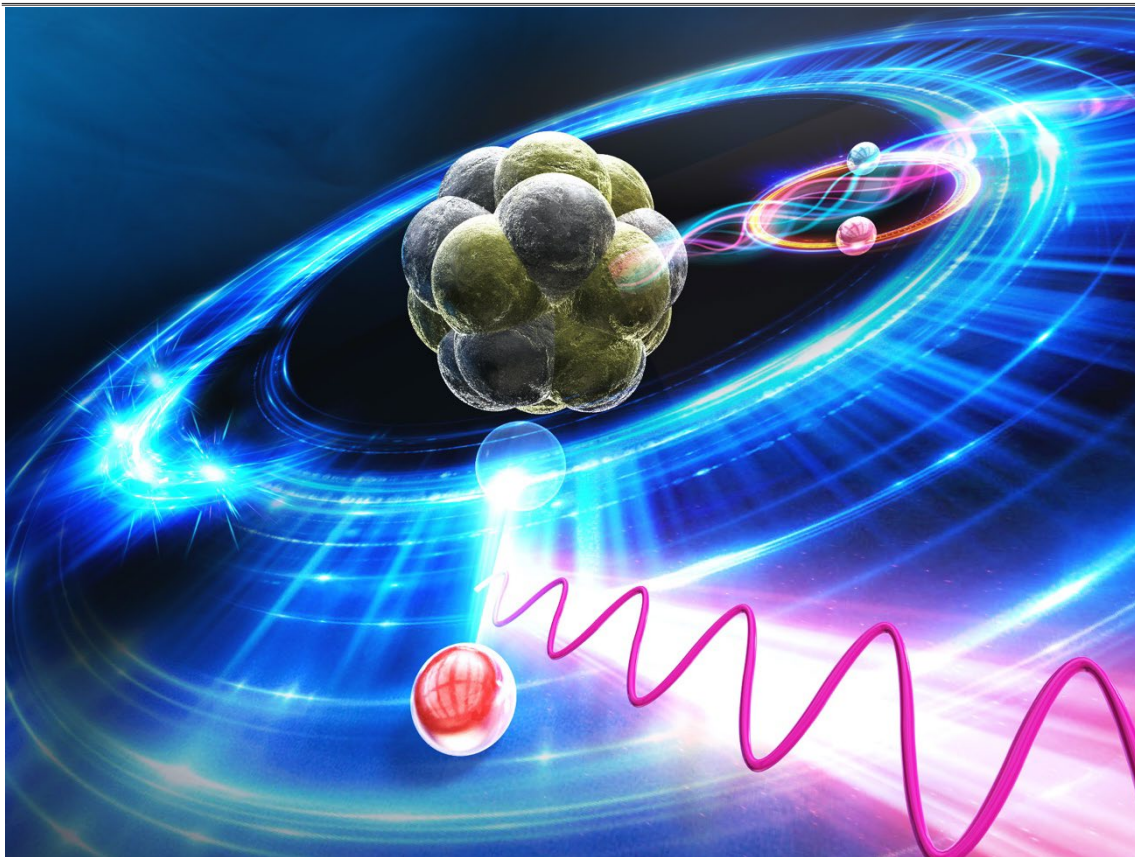
## ーミュオン特性 X 線エネルギーの精密測定に成功ー

理化学研究所（理研）開拓研究本部東原子分子物理研究室の奥村拓馬特別研究員（研究当時、現東京都立大学理学研究科化学専攻助教）、東俊行主任研究員、日本原子力研究開発機構の橋本直研究副主幹、東京都立大学の竜野秀行客員研究員、立教大学の山田真也准教授、カスラー・ブロッセル研究所のポール・インデリカート教授、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構の高橋忠幸教授、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の下村浩一郎教授、中部大学の岡田信二准教授（研究当時、現教授）らの国際共同研究グループは、最先端の X 線検出器である超伝導転移端マイクロカロリメータ（TES）<sup>[1]</sup>を用いて、負ミュオン<sup>[2]</sup>と原子核からなる「ミュオン原子<sup>[2]</sup>」から放出される「ミュオン特性 X 線<sup>[3]</sup>」のエネルギースペクトルを精密に測定し、強電場量子電磁力学<sup>[4]</sup>をエキゾチック原子<sup>[5]</sup>で検証するための原理検証実験に成功しました。

本研究成果は、人類がいまだ人工的には作り出せない超強電場下における基礎物理法則の検証に向けた大きな一歩です。本研究により実証された最先端量子技術による高効率かつ高精度な X 線エネルギー決定法は、ミュオン原子を用いた非破壊元素分析法<sup>[6]</sup>などさまざまな研究分野への応用が期待できます。

今回、国際共同研究グループは大強度陽子加速器施設「J-PARC」<sup>[7]</sup>で得られる低速負ミュオンビームをネオン（Ne）気体に照射し、生成されたミュオン原子（ミュオン Ne 原子）が放出するミュオン特性 X 線のエネルギーを、TES 検出器を使って精密測定しました。TES 検出器の高いエネルギー分解能を最大限に活用することで、ミュオン特性 X 線のエネルギーを、1 万分の 1 を下回る絶対精度で決定し、強電場量子電磁力学における真空分極<sup>[8]</sup>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ました。

本研究は、科学雑誌『*Physical Review Letters*』オンライン版（4 月 27 日付）に掲載されました。



ミュオン Ne 原子と量子電磁力学的效果を示す概念図

## 背景

自然はどのような物理法則に従うのか、それを解き明かすことこそ科学者が抱える長年の夢です。新たな物理法則は、既存の理論では理解できない現象や観測数値を説明するために見いだされてきました。多くの場合、新しい物理の発見には、新実験手法の開発や測定精度の向上が不可欠です。人類が見いだしてきた物理法則の中で最も精密に検証されている理論が、電荷を持つ粒子と光の間のミクロな相互作用を記述する「量子電磁力学 (Quantum Electrodynamics: QED)」です。例えば、現在、陽子と電子という最も簡単な構成の原子である水素原子の遷移エネルギー<sup>[9]</sup>について、QED を含んだ理論計算が 14 桁 (100 兆分の 1) もの精度で実験的に検証されています。QED はどこまで正しい物理理論なのか、その限界を求めて科学者は日々挑戦を続けています。

QED の効果は電場が強い環境でより顕著に現れますが、一方で理論計算は難しくなります。そのため、強電場環境は QED 検証の舞台として非常に重要です。これまで、強電場環境を実現する方法として、複数の電子が剥ぎ取られた重原子である「多価重イオン」を用いた実験が長年進められてきました。原子番号が大きくなり、多くの電子を剥ぎ取ることで遮蔽効果<sup>[10]</sup>が抑制されるため、多価イオン内に残された電子が感じる電場は強くなります。このため、大型加速器を用いて多価重イオンを作る研究が現在も精力的に進められています。しかし、原子

番号が大きい多価重イオンでも、およそ1フェムトメートル(1,000兆分の1メートル)と小さくても原子核の大きさの影響が無視できません。この効果は正確に知られていないため、実験結果と理論を比較するQED検証の精度が大きく損なわれることが指摘されています。

## 研究手法と成果

国際共同研究グループは、多価重イオンとは別の方法で強電場下におけるQEDを検証するため、電子の代わりに負の電荷を持つ重い荷電粒子が原子核に束縛された「エキゾチック原子」に着目しました。数あるエキゾチック原子の中でも、「ミュオン原子」は電子より約200倍重い素粒子である負ミュオン(ミュオン粒子)と原子核により構成され、負ミュオンは大型加速器を用いてビームとして取り出すことができます。

ミュオン原子の特徴は、原子核に束縛された負ミュオンの軌道半径が束縛電子の軌道半径の約200分の1と、ミュオンが原子核に極めて接近していることです。その結果、この負ミュオンが感じる電場は、多価イオン内の同じ量子準位の束縛電子が感じる電場に比べて約4万倍もの強度に達し、QED効果が極めて大きくなります。加えて、あえて原子核との重なりが小さい高角運動量の量子準位を占める負ミュオンを測定に用いることで、原子核の大きさの影響を無視できる程度まで抑えて実験を行うことが可能です。

ミュオン原子が特定の準位からエネルギーのより低い準位へ遷移(脱励起)する際に放出される「ミュオン特性X線」のエネルギーを精密計測することで、多価重イオンを超える強電場下でのQEDの検証が実現できます(図1)。

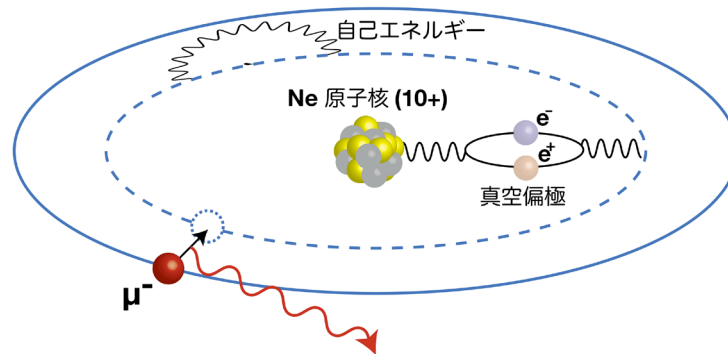


図1 ミュオン原子と量子電磁力学(QED)効果を示す概念図

ミュオン原子において、負ミュオン( $\mu^-$ )は原子核に束縛され、その周りを周回する。QEDによると、束縛負ミュオンは仮想光子の放出・吸収を繰り返しながら周回運動を続ける(自己エネルギー)。また、ネオン原子核( $\text{Ne}^{10+}$ )と負ミュオンの間には静電的な引力が働くが、この相互作用を伝搬する光子は、仮想電子・陽電子対( $e^\pm$ )の生成・消滅を絶えず繰り返す(真空分極)。本研究では、負ミュオンがエネルギー的に安定な軌道に遷移するときに放出されるミュオン特性X線のエネルギーを精密計測した。

このように、ミュオン原子は強電場QED検証のための実験対象として有望ですが、実際に実験を行うとなると乗り越えるべき課題がいくつか存在します。最大の問題点は、孤立環境下で多数のミュオン原子を用意しなければならない点



です。ミュオン原子は電子を引き込みやすい性質を持つため、周囲に他の原子・分子が存在すると速やかに電子の移動が起こり、ミュオン特性 X 線のエネルギーを変化させてしまいます。孤立したミュオン原子を用意するには、数密度（単位体積当たりの個数）の小さい希薄な（圧力が低い）気体原子を用いるしかありませんが、希薄気体標的ではミュオン原子生成量、さらにミュオン特性 X 線の強度が減少するため、これを測定することが難しくなります。

そこで、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やしました。また、低強度のミュオン特性 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マイクロカロリメータ（TES）を導入して実験を行いました。

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<sup>[11]</sup>5.2eV）、ミュオン Ne 原子が放出するミュオン特性 X 線の測定に成功しました（図 2）。図 2 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 線が重なっていますが、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ました。

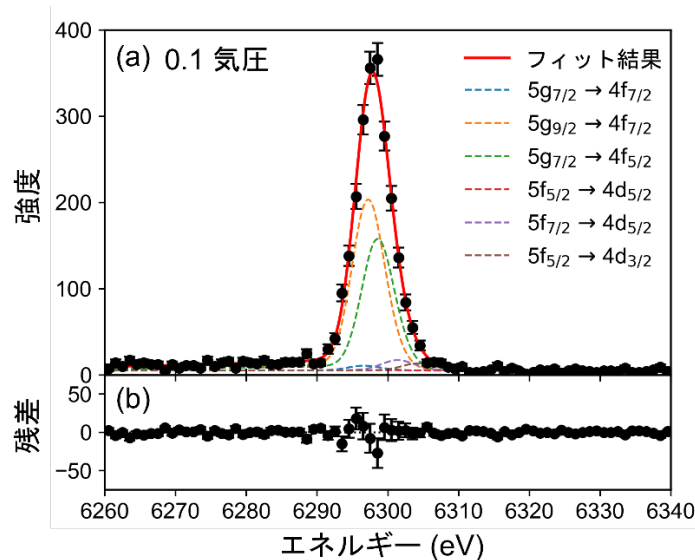


図 2 ミュオン Ne 原子から放出されるミュオン特性 X 線のスペクトル

- (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 Ne 原子から放出されるミュオン特性 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。各々の寄与を考慮したフィッティングを行い、ピークエネルギーを 0.002% の精度で決定した。
- (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。残差が十分に小さいことから、高い精度でフィッティングできたことが分かる。

さらに、ネオンガス標的の圧力を変えながら同様の測定を繰り返しました（図 3）。ミュオン特性 X 線のエネルギーは、ネオン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、周囲の原子が

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ます。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ました。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も 5.8% という極めて高い精度で検証することに成功しました。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 の検証精度に匹敵します。

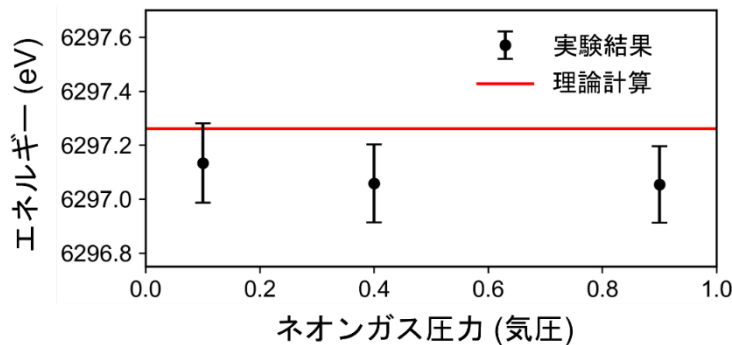


図3 ミュオン特性 X 線エネルギーのネオンガス圧力依存性と最新理論計算との比較

ネオンガス標的の圧力に対してミュオン特性 X 線のエネルギーをプロットした。実験誤差の範囲で圧力によるエネルギー変化は存在せず、ミュオン Ne 原子は孤立環境下にあったことが分かる。また、精密測定により決定したミュオン特性 X 線のエネルギーは、最新理論計算の結果と見事に一致している。

## 今後の期待

本研究では、J-PARC の大強度ミュオンビームと最先端検出器である TES 検出器を組み合わせることで、ミュオン Ne 原子から放出されるミュオン特性 X 線のエネルギーを精密測定し、ミュオン原子を用いた強電場 QED 検証実験の原理を実証しました。ミュオン原子は、従来用いられてきた多価イオンよりもはるかに強い電場を実現可能であり、強電場 QED を検証するための実験対象として極めて有望です。

特に、シュウィンガー極限<sup>[12]</sup>と呼ばれるしきい値を超えた超強電場の世界では、これまで見えてこなかった高次の QED 効果が顕著になることが理論的に予想されていますが、今まで誰も実現したことがありません。多価イオンでは原子番号が非常に大きいウラン ( ${}_{92}\text{U}$ ) を用いてもシュウィンガー極限を超えることができませんが、ミュオン原子では原子番号の小さいアルゴン ( ${}_{18}\text{Ar}$ ) でもこの極限を上回る強電場を実現可能です。今回ミュオン原子を用いた実験手法を実証したことで、強電場下における QED 検証の研究が大きく飛躍するものと期待できます。

また、近年ミュオン原子は非破壊元素分析のツールとしても注目されています。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ます。

## 論文情報

<タイトル>

Proof-of-Principle Experiment for Testing Strong-Field Quantum Electrodynamics with Exotic Atoms: High Precision X-ray Spectroscopy of Muonic Neon

<著者名>

Takuma Okumura, Toshiyuki Azuma, Douglas A. Bennett, I-Huan Chiu, William B. Doriese, Malcolm S. Durkin, Joseph W. Fowler, Johnathon D. Gard, Tadashi Hashimoto, Ryota Hayakawa, Gene C. Hilton, Yuto Ichinohe, Paul Indelicato, Tadaaki Isobe, Sohtaro Kanda, Miho Katsuragawa, Naritoshi Kawamura, Yasushi Kino, Kairi Mine, Yasuhiro Miyake, Kelsey M. Morgan, Kazuhiko Ninomiya, Hirofumi Noda, Galen C. O'Neil, Shinji Okada, Kenichi Okutsu, Nancy Paul, Carl D. Reintsema, Dan R. Schmidt, Koichiro Shimomura, Patrick Strasser, Hirotaka Suda, Daniel S. Swetz, Tadayuki Takahashi, Shinichiro Takeda, Satoshi Takeshita, Motonobu Tampo, Hideyuki Tatsuno, Yasuhiro Ueno, Joel N. Ullom, Shin Watanabe, and Shinya Yamada

<雑誌>

*Physical Review Letters*

<DOI>

[10.1103/PhysRevLett.130.173001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.173001)

## 補足説明

### [1] 超伝導転移端マイクロカロリメータ (TES)

マイクロカロリメータは、物質が X 線を吸収したときの温度上昇から X 線のエネルギーを決定する検出器。超伝導転移端マイクロカロリメータは、臨界温度付近の超伝導薄膜で構成されており、薄膜の温度変化で電気抵抗が大きく変化する。その結果、流れる電流の変化を測定し、吸収された X 線のエネルギーを決定することができる。TES はエネルギー分解能が非常に高く、最近宇宙物理から材料科学まで幅広い科学的用途で使用され始めた。TES は Transition-Edge Sensor の略。

### [2] 負ミュオン、ミュオン原子

ミュオンは素粒子の一つであり、標準模型における第二世代の荷電レプトンである。正または負の電荷を持つミュオンが存在し、いずれも 1/2 のスピンを持ち、平均寿命は 2.2 マイクロ秒 (1 マイクロ秒は 100 万分の 1 秒) である。「負ミュオン」は弱い相互作用によって電子、ミューニュートリノおよび反電子ニュートリノに崩壊する。負ミュオンは電子よりも約 200 倍重く、電子と同じ負の電荷を持つため、電子と同様に、正の電荷を持つ原子核に束縛され「重い電子」として振る舞う。負ミュオンと原子核により構成される原子を「ミュオン原子」と呼ぶ。ミュオン原子は、最終的には負ミュオンの寿命、あるいは負ミュオンが原子核に捕獲されることで崩壊する。

### [3] ミュオン特性 X 線

原子核に束縛された負ミュオンが高いエネルギーの軌道から低いエネルギーの軌道に遷移する際、余分なエネルギーは X 線として放出される。この X 線は原子により固有のエネルギーを持ち、ミュオン特性 X 線と呼ばれる。

#### [4] 量子電磁力学

電荷を持つ粒子間では光子をやり取りすることで、電磁相互作用が働くとする場の理論。相対論的量子力学では理解できないさまざまな現象を説明することに成功している。

#### [5] エキゾチック原子

原子を構成する原子核または電子を他の荷電粒子（陽電子、ミュオン、反陽子、パイオンなど）で置き換えてできた原子をエキゾチック原子と呼ぶ。エキゾチック原子を構成する粒子の電荷や質量の組み合わせは、電子や原子核と比べて大きく異なるため、通常の原子にはない興味深い振る舞いをする。

#### [6] ミュオン原子を用いた非破壊元素分析法

未知試料の非破壊元素分析法として、試料に高エネルギーX線・電子線を照射した際に放出される電子特性X線を計測する手法が広く用いられてきた。しかし、炭素・水素などの軽元素が放出する電子特性X線はエネルギーが低く、十分な精度で元素分析を行うことは困難である。最近、試料物質に負ミュオンビームを照射した際に放出されるミュオン特性X線により非破壊元素分析を行う手法が確立された。一般にミュオン特性X線は電子特性X線よりもエネルギーが高いため、本手法は軽元素に対して極めて高い感度を持つ。ミュオンを用いた元素分析法は小惑星「りゅうぐう」から持ち帰られた試料の分析にも利用され、その有用性が示されている。

#### [7] 大強度陽子加速器施設「J-PARC」

J-PARCは茨城県東海村にある加速器施設で、世界最高レベルの強度の陽子ビームを利用して、素粒子・原子物理学、物質・生命科学などさまざまな分野の先端研究が行われている。J-PARC内の物質・生命科学実験施設（MLF）に、世界最高強度の低速ミュオンビームを発生させることができるミュオン科学実験施設（MUSE）がある。

#### [8] 真空分極

ミュオン原子エネルギーへの量子電磁力学的効果は、主に真空分極と自己エネルギーの2種類に分類される。量子電磁力学によると、仮想粒子とは粒子間相互作用の中間状態として一瞬だけ存在する粒子のことである。電磁氣的相互作用を担う光子は絶えず仮想電子・陽電子対の生成・消滅反応を繰り返している。この仮想電子・陽電子対の生成・消滅に伴うエネルギー変化を真空分極と呼ぶ。また、ミュオン原子中の束縛ミュオンは、絶えず仮想光子の吸収と放出を繰り返しており、この過程によるエネルギー変化を自己エネルギーと呼ぶ。ミュオン原子への量子電磁力学的効果では特に真空分極の効果が大きいことが知られており、ミュオンNe原子の場合、真空分極の影響の方が自己エネルギーより1,000倍以上大きい。

#### [9] 遷移エネルギー

量子力学によると、原子核に束縛されたミュオンや電子は離散的な軌道を運動しなければならない、それに伴いそのエネルギーも同様に離散化（量子化）される。エネルギーが高い軌道から低い軌道へ粒子が遷移する際に生じる余分なエネルギーのことを遷移エネルギーと呼ぶ。多くの場合、遷移エネルギーは電磁波（光やX線）として放出される。



## [10] 遮蔽効果

複数の電子を持つ原子において、電子と原子核の間のクーロン力が残りの電子の電荷のために減少しているように見える効果のこと。

## [11] 半値幅

ある観測値の半分の値のときの横幅を示す。検出器における半値幅では、この値が小さいほど分解能の高い観測が実現でき、ピーク位置の精密な計測が可能である。

## [12] シュウィンガー極限

量子電磁力学によると、電場強度  $1.32 \times 10^{18} \text{V/m}$  を超える超強電場では、電磁場に非線形な効果が現れるとされる。この極限電場のことを、物理学者ジュリアン・シュウィンガーの名前にちなんでシュウィンガー極限と呼ぶ。

## 国際共同研究グループ

本研究は、日本原子力研究開発機構（JAEA）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同運営する大強度陽子加速器施設「J-PARC」物質・生命科学実験施設（MLF）において、理化学研究所、アメリカ国立標準技術研究所（NIST）、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、大阪大学、JAEA、東京都立大学、立教大学、カスラー・ブロッセル研究所（フランス）、KEK 物質構造科学研究所、東北大学、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、中部大学が参加する国際共同研究グループによる実験で得られた成果を基にしています。

特に、理化学研究所、中部大学は研究全体を統括主導する役割を果たし、NIST は検出器開発で中心的役割を果たしました。KEK 物質構造科学研究所は低速負ミュオンビームの開発運転や実験装置の設置に、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、大阪大学、JAEA、東京都立大学、立教大学、カスラー・ブロッセル研究所、東北大学、JAXA は実験装置や計測系の開発および実験データの取得・解析に、それぞれ大きな役割を果たしました。

### 理化学研究所

開拓研究本部 東原子分子物理研究室

特別研究員（研究当時） 奥村拓馬（オクムラ・タクマ）  
 （現 東京都立大学 大学院理学研究科 化学専攻 助教）

主任研究員 東 俊行（アズマ・トシユキ）

基礎科学特別研究員（研究当時） 上野恭裕（ウエノ・ヤスヒロ）

仁科加速器科学研究センター RI 物理研究室

専任研究員 磯部忠昭（イソベ・タダアキ）

### アメリカ国立標準技術研究所（NIST）

研究員 ダグラス・ベネット（Douglas A. Bennett）

研究員 ウィリアム・ドリース（William B. Doriese）

研究員 マルコム・ダーキン（Malcolm S. Durkin）

研究員 ジョセフ・フォウラー

（Joseph W. Fowler）

研究員 ジョナサン・ガード（Johnathon D. Gard）

研究員 ジーン・ヒルトン（Gene C. Hilton）

研究員 ケルシー・モーガン（Kelsey M. Morgan）



(コロラド大学ボルダー校 理工学部 物理学科 研究員)	
研究員	ガレン・オニール (Galen C. O'Neil)
研究員	カール・ラインツィマ (Carl D. Reintsema)
研究員	ダン・シュミット (Dan R. Schmidt)
研究員	ダニエル・スウェッツ (Daniel S. Swetz)
研究員	ジョエル・ウロム (Joel N. Ullom)
大阪大学大学院 理学研究科 化学専攻	
助教 (研究当時)	二宮和彦 (ニノミヤ・カズヒコ)
(現 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)	
特任研究員	キュウ・イーファン (I-Huan Chiu)
(現 日本原子力研究開発機構 (JAEA) 物質科学研究センター 博士研究員)	
宇宙地球科学専攻	
助教	野田博文 (ノダ・ヒロフミ)
日本原子力研究開発機構 (JAEA) 先端基礎研究センター	
研究副主幹	橋本 直 (ハシモト・タダシ)
東京都立大学 大学院理学研究科 物理学専攻	
客員研究員	竜野秀行 (タツノ・ヒデユキ)
大学院生 (研究当時)	早川亮大 (ハヤカワ・リョウタ)
(現 高エネルギー加速器研究機構 量子場計測システム国際拠点 研究員)	
大学院生 (研究当時)	須田博貴 (スダ・ヒロタカ)
立教大学 理学部 物理学科	
准教授	山田真也 (ヤマダ・シンヤ)
助教 (研究当時)	一戸悠人 (イチノヘ・ユウト)
(現 理研 仁科加速器研究センター 情報処理技術チーム 研究員)	
カスラー・ブロッセル研究所 (フランス)	
教授	ポール・インデリカート (Paul Indelicato)
研究員	ナンシー・ポール (Nancy Paul)
高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所	
教授	下村浩一郎 (シモムラ・コウイチロウ)
特別教授 (研究当時、現 研究員)	三宅康博 (ミヤケ・ヤスヒロ)
特別准教授	河村成肇 (カワムラ・ナリトシ)
研究機関講師 (研究当時、現 講師)	パトリック・ストラッサー (Patrick Strasser)
助教	神田聡太郎 (カンダ・ソウタロウ)
助教 (研究当時、現 研究機関講師)	竹下聡史 (タケシタ・ソウシ)
研究員	反保元伸 (タンボ・モトノブ)
東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)	
教授	高橋忠幸 (タカハシ・タダユキ)
特任助教	武田伸一郎 (タケダ・シンイチロウ)
特任研究員	桂川美穂 (カツラガワ・ミホ)
大学院生 (研究当時)	峰 海里 (ミネ・カイリ)
東北大学 大学院理学研究科 化学専攻	
准教授 (研究当時、現 教授)	木野康志 (キノ・ヤスシ)
助教 (研究当時)	奥津賢一 (オクツ・ケンイチ)
(現 学習院大学 理学部 化学科 助教)	

中部大学 工学部 創造理工学実験教育科  
 准教授（研究当時） 岡田信二 （オカダ・シンジ）  
 （現 理工学部 数理・物理サイエンス学科 教授）  
 宇宙航空研究開発機構（JAXA） 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系  
 助教（研究当時、現 准教授） 渡辺 伸 （ワタナベ・シン）

## 研究支援

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業新学術領域研究（研究領域提案型）「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。（領域代表者：高橋忠幸）」「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（研究代表者：東俊行）」、同基盤研究（A）「トリウム-229 核異性体構造の解明：高精度時計科学の新展開（研究代表者：磯部忠昭）」「超伝導分子検出器を用いた原子分子ダイナミクス研究の革新（研究代表者：岡田信二）」、同挑戦的研究（開拓）「精密 X 線分光偏光観測に向けた極低温コンプトンカメラの開発（研究代表者：山田真也）」、同若手研究「先端中性分子検出器で探る宇宙環境中での負イオンの化学反応（研究代表者：奥村拓馬）」、同学術変革領域（A）「星間化学反応の全貌解明に向けた次世代中性分子検出システムの開発（研究代表者：奥村拓馬）」、および RIKEN Pioneering Project による助成を受けて行われました。

## 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 開拓研究本部 東原子分子物理研究室  
 特別研究員（研究当時） 奥村拓馬 （オクムラ・タクマ）  
 （現 東京都立大学 理学研究科 化学専攻 助教）  
 主任研究員 東 俊行 （アズマ・トシユキ）

日本原子力研究開発機構（JAEA） 先端基礎研究センター  
 研究副主幹 橋本 直 （ハシモト・タダシ）

東京都立大学 大学院理学研究科 物理学専攻  
 客員研究員 竜野秀行 （タツノ・ヒデユキ）

立教大学 理学部 物理学科  
 准教授 山田真也 （ヤマダ・シンヤ）

カスラー・ブロッセル研究所  
 教授 ポール・インデリカート（Paul Indelicato）

東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構  
 教授 高橋忠幸 （タカハシ・タダユキ）

高エネルギー加速器研究機構（KEK） 物質構造科学研究所  
 教授 下村浩一郎 （シモムラ・コウイチロウ）

中部大学 工学部 創造理工学実験教育科  
准教授（研究当時） 岡田信二 （オカダ・シンジ）  
（現 理工学部 数理・物理サイエンス学科 教授）

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当  
Tel: 050-3495-0247  
Email: ex-press [at] ml.riken.jp

日本原子力研究開発機構 広報部 報道課  
Tel: 029-282-0749  
Email: sato.akio [at] jaea.go.jp

東京都立大学 管理部企画広報課 広報係  
Tel: 042-677-1806 Fax: 042-677-1830  
Email: info [at] jmj.tmu.ac.jp

立教大学 総長室 広報課  
Tel: 03-3985-2202  
Email: koho [at] rikkyo.ac.jp

東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 広報課  
Tel: 080-4056-2930/04-7136-5977  
Email: press [at] ipmu.jp

高エネルギー加速器研究機構 広報室  
Tel: 029-879-6047 Fax: 029-879-6049  
Email: press [at] kek.jp

J-PARC センター 広報セクション  
Tel: 029-284-4578 Fax: 029-284-4571  
Email: pr-section [at] j-parc.jp

中部大学 学園広報部広報課  
Tel: 0568-51-7638 Fax: 0568-51-1186  
Email: cuinfo [at] office.chubu.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。