

2025年6月19日

東京都立大学法人 東京都立大学

国立研究開発法人 理化学研究所

国立大学法人 東北大学

学校法人 立教学院

学校法人 中部大学

国立大学法人 東京大学

国立大学法人 筑波大学

J-PARC センター

大学共同利用機関法人

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 (WPI-QUP)

大学共同利用機関法人

自然科学研究機構核融合科学研究所

新たな原子系「多価ミュオンイオン」の観測に成功 —宇宙観測検出器が捉えるエキゾチック原子の世界—

1. 概要

東京都立大学大学院理学研究科 化学専攻の奥村拓馬 准教授、理化学研究所開拓研究所の東俊行 主任研究員（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特任教授）、同開拓研究所の橋本直 理研 ECL 研究チームリーダー（仁科加速器科学研究センター理研 ECL 研究チームリーダー）、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の早川亮大 研究員、同物質構造科学研究所の下村浩一郎 特別教授、自然科学研究機構核融合科学研究所研究部 プラズマ量子プロセスユニットの加藤太治 教授、東北大学大学院理学研究科化学専攻の木野康志 教授、同研究科天文学専攻の野田博文 准教授、立教大学理学部物理学科の山田真也 准教授、中部大学の岡田信二 教授、外山裕一 特任助教、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構の高橋忠幸 特任教授、筑波大学計算科学研究センターの Tong Xiao-Min 准教授らによる研究グループは、最先端の X 線検出器である「超伝導転移端センサーマイクロカロリメータ (Transition-Edge Sensor: TES)」(注 1) を駆使し、新たなエキゾチック原子 (注 2) 系「多価ミュオンイオン」の観測に成功しました。多価ミュオンイオンは、1 つの原子核が少数の電子と負電荷を帯びた素粒子「負ミュオン」(注 3) を同時に束縛した原子系です。これまで理論的には存在が予測されていましたが、実験的に直接観測されたのは今回が初めてです。多価ミュオンイオンは、正電荷をもつ原子核が異種の負電荷をもつ粒子を同時に束縛するという、他に類のないユニークな系であり、新たな量子少数多体系 (注 4) としての関心に加え、負ミュオンと原子・分子の相互作用を探る新たなプローブとしての可能性も秘めています。本研究は、科学雑誌『Physical Review Letters』の Editors' Suggestion に選ばれ、オンライン版 (6 月 16 日付) に掲載されました。

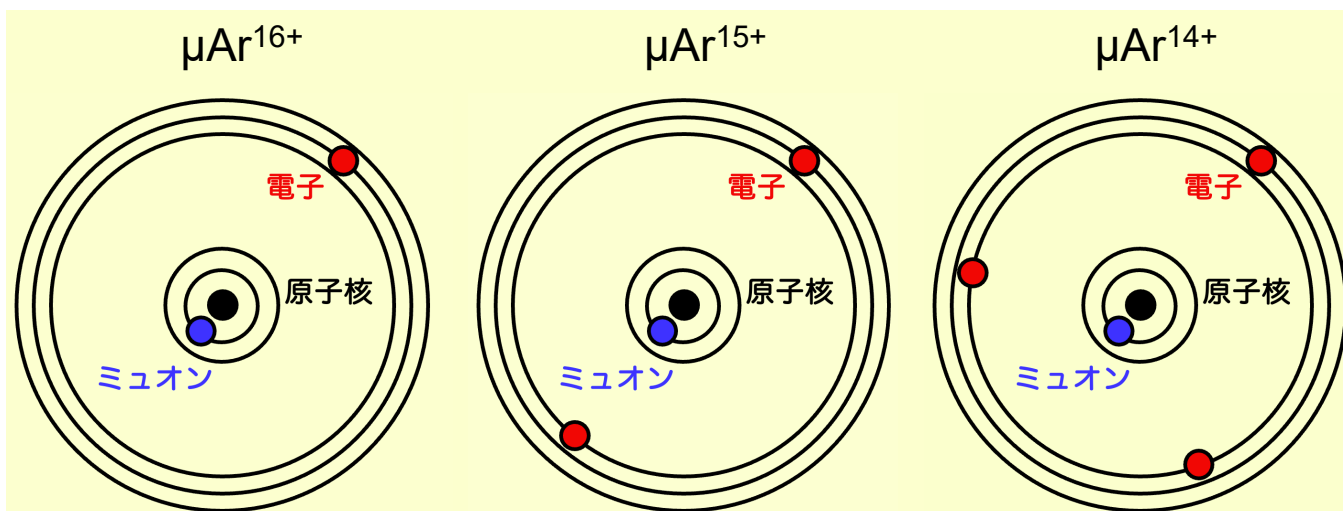


図1：本研究で観測した多価ミュオンイオン（ μAr^{16+} 、 μAr^{15+} 、 μAr^{14+} ）の模式図。 μAr^{16+} 、 μAr^{15+} 、 μAr^{14+} は、負ミュオンに加えて電子をそれぞれ1,2または3個束縛している。

2. ポイント

- ・「多価ミュオンイオン」の存在は理論的に予想されていたものの、X線検出器のエネルギー分解能の限界や、周囲の原子からの速い電荷移行反応により、実験的な観測は困難であった。
- ・茨城県東海村の大強度陽子加速器施設（J-PARC）の大強度ミュオンビームとTES検出器を組み合わせることで、低圧の気体原子を標的としたX線分光実験が実現し、電荷移行反応を抑制した条件下の測定が可能になった。
- ・TES検出器の卓越したエネルギー分解能により、多価ミュオンイオンに束縛された電子の個数およびその量子状態までを識別して観測することに成功した。

3. 研究の背景

原子は、中心に存在する原子核と、その周囲を取り巻く電子から構成されています。通常、原子は電氣的に中性ですが、複数の電子が取り除かれると、「多価イオン」と呼ばれる高い正電荷をもつイオンが生成されます。この多価イオンは、基礎物理学をはじめ、核融合プラズマ、表面科学、天文学など、さまざまな科学分野において重要な役割を果たしています。特に、プラズマ（電離した原子や分子の集まり）の中で多価イオンが数多く存在します。プラズマは、宇宙の星々や太陽のような高温の環境で見られる状態で、多価イオンが放出する電子特性X線（注5）を測定することで、プラズマの状態を詳しく調べることが可能です。

私たちの研究グループでは、多価イオンの新たな一形態として、原子核と電子に加えて、負の電荷を持つ素粒子「ミュオン」を含む「多価ミュオンイオン」に注目しました（図1参照）。負ミュオンは電子と類似した性質をもつものの、その質量は電子よりも207倍と重いため、より原子核に近い軌道に束縛されます。多価ミュオンイオンは、1つの原子核に電子とミュオンという異なる2種類の荷電粒子が同時に束縛された、極めてユニークな量子少数多体系であり、その性質の解明は、新たな研究分野の開拓につながることを期待されています。

この多価ミュオンイオンの存在は理論的には予測されていたものの、実験的に確認された例はありませんでした。十分に減速された負ミュオンビームを原子に衝突させると、負ミュオンは原子に捕獲され、その後、周囲

の電子を弾き飛ばしながら段階的に内側への軌道に遷移して原子核に近づいていきます。この過程は「ミュオンカスケード」と呼ばれ、多価ミュオンイオンはこの過程の中で形成されと考えられています。しかし、多価ミュオンイオンは周囲の物質から電子を引き寄せやすく、生成直後に再び電子を取り込んでしまいます（電荷移行反応）。さらに、そのような多価ミュオンイオンの電子状態（注6）を調べるために適切な分光観測方法もこれまで存在しませんでした。

4. 研究の詳細

多価ミュオンイオンの観測においては、周囲の物質からの電荷移行反応を抑制することが重要です。そのため、原子数密度が小さい低圧の気体標的を用いて実験を行う必要があります。しかし、原子数密度を下げると標的中に負ミュオンを静止させることが困難になり、多価ミュオンイオンの生成量も減少してしまうという課題があります。そこで本研究では、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ラインにおいて世界最高強度の低速負ミュオンビームを用いて実験を行い、多価ミュオンイオンの生成量を増やしました。

本研究では、多価ミュオンイオンが放出する電子特性X線エネルギーの精密測定を目指しました。電子特性X線のエネルギーは原子核に束縛されている電子の個数や状態に応じて異なるため、そのエネルギーを正確に測定することで多価ミュオンイオンの電子状態を識別することが可能です。従来、このような小さなエネルギー差を識別するためには結晶分光器が用いられてきましたが、検出効率が極めて低く、多価ミュオンイオンのような生成量の少ない系の観測には適していませんでした。この困難を克服するため、私たちの研究グループは、最先端技術である超伝導転移端センサーマイクロカロリメータ（TES）を導入しました。TES検出器は、宇宙X線観測をはじめとする高精度分光を目的として開発が進められてきたX線検出器であり、優れたエネルギー分解能と高い検出効率を両立するだけでなく、広いエネルギー領域に対応可能という利点を備えています。TES検出器を利用することで、数千電子ボルト（eV）のX線に対して0.1 eVの精度でエネルギーを測定することができ、多価ミュオンイオンのような希少な系に対しても有効な分光観測が可能となります。

0.1気圧のアルゴン原子（Ar）を標的とした場合のX線スペクトルを図2に示します。2700-2850 eVの範囲に3本、2900-3050 eVの範囲に1本のピークが観測されました。それぞれのX線エネルギーを電子状態計算の結果と比較したところ、高エネルギー側のピークは束縛電子を1個有する多価ミュオンアルゴンイオン（ μAr^{16+} ）、低エネルギー側の3本のピークは束縛電子を2個または3個有する μAr^{15+} 、 μAr^{14+} が放出した電子特性X線とエネルギーが一致することが判明しました。特に、2個の電子が束縛された μAr^{15+} によるX線は2つのピークに分かれており、それぞれスピンの向きが異なる電子状態に対応しています。このように、TES検出器の優れたエネルギー分解能を生かすことで、束縛電子のスピンの向きまで踏み込んだ、多価ミュオンイオンの詳細な観測に成功しました。

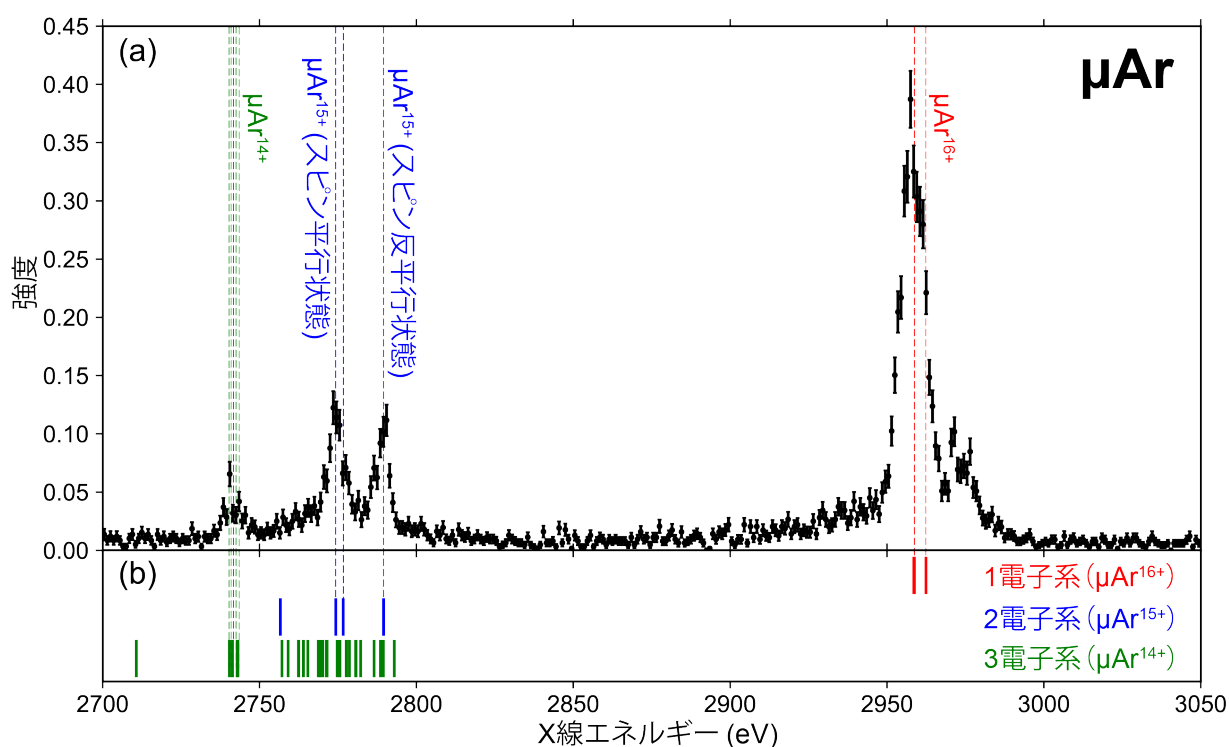


図 2 : (a) TES 検出器を用いて測定した多価ミュオンアルゴンイオン μAr の X 線スペクトル。(b) μAr が放出する電子特性 X 線エネルギーの理論計算の結果。

5. 研究の意義と波及効果

多価ミュオンイオンは、1つの原子核に2種類の異なる荷電粒子（電子と負ミュオン）が束縛された、これまでにないまったく新しい種類の原子であり、基礎科学の観点から非常に興味深い系です。負ミュオンと電子の相互作用により、通常の原子では現れない性質が発現する可能性があります。例えば、本研究においても、多価ミュオンアルゴンイオンの生成量を詳細に分析した結果、負ミュオンが Ar 原子に捕獲される際に”軌道崩壊”（注 7）と呼ばれる現象が重要な役割を果たしていることを、理論的に突き止めました[1]。この現象自体は通常の原子や多価イオンでも起こることが知られていますが、本研究で示された軌道崩壊は、電子と負ミュオンの相互作用および負ミュオンの大きな質量に起因して発現するものであり、まさに多価ミュオンイオンに特有の現象であると考えられます。

また、通常の高価イオンがプラズマの診断に用いられるように、多価ミュオンイオンの分光によって得られる情報を通じて、ミュオンカスケードのダイナミクスを調べることも可能です。近年、負ミュオンは基礎物理法則の検証や非破壊元素分析など、自然科学の様々な分野で応用が期待されています。中でも、負ミュオンと原子との衝突過程である、ミュオンカスケードは最も基本的な過程であり、その詳細なダイナミクスの解明は今後ますます重要性を増すと予想されます。本研究により確立した多価ミュオンイオンの高精度分光技術は、負ミュオンの新たな応用展開を広げるための礎となることが期待されます。

6. 参考

[1] X. M. Tong, K. Tőkési, D. Kato, T. Okumura, S. Okada, and T. Azuma, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 193001 (2025).

7. 論文情報

<タイトル>

Few-electron highly charged muonic Ar atoms verified by electronic K x rays

<著者名>

T. Okumura, T. Azuma, D. A. Bennett, W. B. Doriese, M. S. Durkin, J. W. Fowler, J. D. Gard, T. Hashimoto, R. Hayakawa, Y. Ichinohe, P. Indelicato, T. Isobe, S. Kanda, D. Kato, M. Katsuragawa, N. Kawamura, Y. Kino, N. Kominato, Y. Miyake, K. M. Morgan, H. Noda, G. C. O'Neil, S. Okada, K. Okutsu, N. Paul, C. D. Reintsema, T. Sato, D. R. Schmidt, K. Shimomura, P. Strasser, D. S. Swetz, T. Takahashi, S. Takeda, S. Takeshita, M. Tampo, H. Tatsuno, K. Tőkési, X. M. Tong, Y. Toyama, J. N. Ullom, S. Watanabe, S. Yamada, and T. Yamashita

<雑誌名>

Physical Review Letters

<DOI> [10.1103/PhysRevLett.134.243001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.243001).

8. 補足説明

(注 1) 超伝導転移端センサーマイクロカロリメータ TES

マイクロカロリメータとは、X 線のエネルギーを吸収による温度上昇として測定する装置であり、吸収体と温度センサーから構成される。TES (Transition Edge Sensor) 検出器は、この温度センサーに超伝導体を用いたマイクロカロリメータである。超伝導体は、超伝導転移温度付近において、電気抵抗がゼロから有限値へ急激に変化するという性質を持つ。このため、超伝導体を転移温度よりもわずかに低い温度で維持し吸収体と熱的に接触させることで、X 線吸収に伴うわずかな温度上昇を大きな電気抵抗変化として捉えることが可能である。TES 検出器は、この超伝導体の鋭敏な温度応答性を活用することで、極めて高いエネルギー分解能を実現している。

(注 2) エキゾチック原子

通常の原子は、陽子と中性子から成る原子核と、その周囲を取り巻く電子から構成されている。これに対し、原子を構成する粒子の一部を他の粒子で置き換えた原子系は、「エキゾチック原子」と呼ばれている。たとえば、電子を負ミュオンで置き換えた原子はエキゾチック原子の一種であり、「ミュオン原子」と称される。本研究で観測に成功した「多価ミュオンイオン」は、ミュオン原子から複数の電子が失われた高電荷状態のミュオン原子である。

(注 3) 負ミュオン

ミュオンは第二世代のレプトンに分類される素粒子であり、正の電荷を帯びた正ミュオンと負の電荷を帯びた負ミュオンが存在する。特に負ミュオンは電子と非常によく似た性質を持つが、電子との主な違いは質量にあり、その質量は電子の 207 倍である。また、その寿命は 2.2 μs (マイクロ秒、100 万分の 1 秒) であり、電子とニュートリノに崩壊する。

(注 4) 量子少数多体系

量子力学において複数の粒子から構成される系を量子少数多体系と呼ぶ。複数の粒子が互いに力を及ぼし合いながら強く作用し合い、理論的な取り扱いが極めて難解となるため、量子力学における重要なトピックの一つとされている。多価ミュオンイオンは、原子核と負ミュオンに加え、さらに複数の電子が束縛された系であり、通常の原子や分子には存在しない、負ミュオンと電子の特徴的な相関を示す量子少数多体系である。

(注 5) 電子特性X線

原子や多価イオンの最も内側の軌道を占める電子（内殻電子）がイオン化されると、外側の電子が内側に移動して、余剰エネルギーをX線として放出することがある。このとき放出されるX線は電子特性X線と呼ばれる。電子特性X線のエネルギーは、X線放出時の原子・多価イオンの電子の個数や配置に敏感であり、X線エネルギーの精密測定によって原子内の電子状態を詳細に分析することが可能となる。多価ミュオンイオンでも、内殻電子がイオン化された際に電子特性X線を放出する。

(注 6) 電子状態

原子や分子において、束縛電子がどのように配置されているかを表す概念が電子状態である。量子力学によると、束縛電子は原子核の周りの決まった（量子化された）軌道上を運動しており、その配置によって、原子の量子状態や内部エネルギーが変化する。本研究で観測に成功した μAr^{15+} の2つの電子状態は、2個の電子のスピン（電子の自転方向に対応する概念）の相対的な向きが異なる。

(注 7) 軌道崩壊

束縛電子の波動関数の大きさは、ある原子番号において不連続に変化することが知られている。この現象は「軌道崩壊」と呼ばれている。電子軌道は、原子核の正電荷による引力と、他の電子からの反発力とのバランスにより決定されているが、このバランスが崩れると軌道半径が大きく変化し、軌道崩壊が生じる。中性原子や通常の高価イオンにおいて軌道崩壊が発現することは以前から知られていたが、負ミュオンを含むエキゾチック原子系においてこの現象を確認したのは、本研究グループが初めてである。

9. 補足

本研究は、文部科学省科学研究費助成事業 新学術領域研究 (2018-2022)「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。」(https://member.ipmu.jp/SpaceTech_to_QuantumBeam/index.html)に参画する研究者の連携のもと生み出された成果です。

10. 問合せ先

(研究に関すること)

東京都立大学大学院 理学研究科 准教授 奥村拓馬

TEL : 042-677-1111 (内線 : 3448) E-mail : tokumura@tmu.ac.jp

(報道に関すること)

東京都公立大学法人

東京都立大学管理部 企画広報課 広報係

TEL : 042-677-1806 E-mail : info@jmj.tmu.ac.jp

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel : 050-3495-0247 Email : ex-press@ml.riken.j

大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構 広報室

Tel : 029-879-6047 E-mail : press@kek.jp

大学共同利用機関法人

自然科学研究機構 核融合科学研究所 管理部総務企画課対外協力係

TEL : 0572-58-2016 E-mail : taigai-kakari@nifs.ac.jp

国立大学法人

東北大学大学院 理学研究科・広報・アウトリーチ支援室

TEL : 022-795-6708 E-mail : sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

学校法人 立教学院 企画部 広報室

TEL : 03-3985-2202 E-mail : koho@rikkyo.ac.jp

学校法人 中部大学 入試・広報センター

TEL : 0568-51-5541 E-mail : chubu-info@fsc.chubu.ac.jp

国立大学法人

東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構

広報担当 小森 真里奈

TEL : 04-7136-5977 E-mail : press@ipmu.jp

国立大学法人

筑波大学 計算科学研究センター 広報・戦略室

TEL : 029-853-6260 E-mail : pr@ccs.tsukuba.ac.jp

J-PARC センター広報セクション

TEL : 029-287-9600 E-mail : pr-section@ml.j-parc.jp