



報道関係各位

2026年6月11日

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構  
国立研究開発法人理化学研究所

## 不安定核ランタン 149 の基底状態を識別し質量を精密決定

～質量-半減期同時測定により原子核の状態を識別～

### 本研究成果のストーリー

#### ● Question

原子核を形づくる陽子や中性子がどのように結びつき、さまざまな原子核構造を生み出すのかを理解することは、原子核物理学の基本的な目標です。原子核の質量は、原子核構造の理解や理論モデルの検証に不可欠な基礎データです。中性子過剰同位体ランタン 149 については、先行する質量測定から、原子核質量に基づく指標である二中性子分離エネルギーが、通常的な変化から外れる、特異な振る舞いを示す可能性が示唆されていました。この解釈を検証するためには、鍵となるランタン 149 の基底状態質量を高い確度で決定することが求められていました。

#### ● Findings

本研究では、多重反射型飛行時間測定式(MRTOF)質量分光器にベータ崩壊検出機構を組み合わせて、質量と半減期を同時に測定しました。これにより、測定されたイオンがどの原子核状態に対応するのかを識別しながら質量を決定することが可能となりました。その結果、ランタン 149 の基底状態質量を高い確度で決定しました。本研究で得られた質量値を用いると、先行測定から示唆されていたランタン同位体に特有の二中性子分離エネルギーの振る舞いは見られませんでした。

#### ● Meaning

本研究により、ランタン 149 の基底状態質量を高い確度で決定し、原子核構造の理解や理論モデルの検証に不可欠な情報を得ることができました。本成果は、短寿命核の質量測定において、質量だけでなく半減期を同時に測定し、原子核状態を識別することの重要性を示しました。これにより、ランタン 149 を含む中性子過剰ランタン同位体の構造を議論するための、より確かな実験的基盤が得られました。



120文字  
サマリー

原子核の「質量」と「寿命」を同時に測定し、不安定原子核ランタン 149 の基底状態質量を明確に決定しました。これにより、先行測定から示唆されていた中性子過剰なランタン同位体に特有の質量の振る舞いは見られないことを示し、構造理解に新たな手がかりを与えました。

## 概要

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センターの木村創大研究員、和田道治名誉教授(現中国科学院近代物理研究所)、国立研究開発法人理化学研究所の開拓研究所・上野核分光研究室、兼仁科加速器科学研究センター・核構造研究部のマルコ＝ローゼンブッシュ研究員、および同核構造研究部低速 RI ビーム生成装置開発チームの石山博恒チームリーダーを中心とする国際共同研究グループは、多重反射型飛行時間測定式(MRTOF)質量分光器<sup>(※1)</sup>を用いて、不安定短寿命同位体ランタン 149 の質量-半減期同時測定に成功しました。これにより、ランタン 149 について基底状態<sup>(※2)</sup>の質量値を精密に決定しました。また、原子核状態を識別しながらランタン 149 の質量を測定することで、先行する質量測定から示唆されていた、ランタン同位体に特有の質量の振る舞いは見られないことを示しました。この結果は、中性子過剰なランタン同位体の構造理解に新たな手がかりを与えるものです。

本研究の成果は、物理学の国際的な専門誌である「Physical Review Letters」に掲載されました。

## 研究グループ

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)・素粒子原子核研究所・和光原子核科学センターと国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センターを中心とし、九州大学および中国科学院近代物理研究所からなる国際共同研究グループ(順不同)。

## 研究背景

陽子や中性子(これらをまとめて核子と呼びます)を原子核の中に結び付けている「核力」を理解することは、原子核物理学の基本的な目標です。多くの原子核は完全な球形ではなく、変形していると考えられています。原子核がどのような形をとるかは、核力の性質や陽子・中性子の配置と深く関係しているため、原子核の変形を調べることは、原子核構造を理解するための重要な手がかりとなります。

原子核は核子の構成が変わったときその形状が大きく変化することがあり、原子核の質量を精密に測定することでこの変化を捉えることが可能です。実際には二中性子分離エネルギー( $S_{2n}$ )<sup>(※3)</sup>という原子核質量から計算可能な物理量がその指標としてよく用いられています。 $S_{2n}$ は一般的に原子核の中性子数が増えるにつれスムーズに減少してゆきます(図1)。何らかの原子核構造の変化、例えば魔法数による安定化や原子核形状の変化がある場合は $S_{2n}$ の折れ曲りとして現れます。

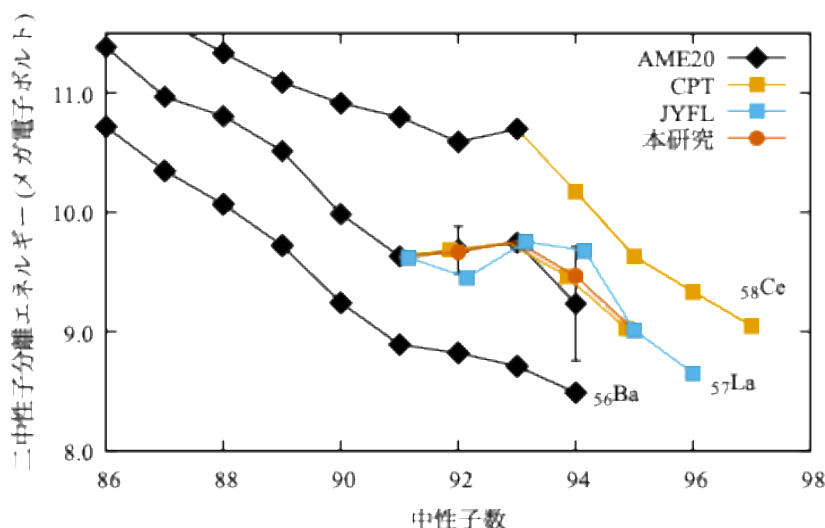


図 1 二中性子分離エネルギー。バリウム (Ba、原子番号 56)、ランタン (La、原子番号 57)、およびセリウム (Ce、原子番号 58) の中性子過剰な不安定領域のデータがプロットされています。黒色は AME20<sup>(※7)</sup> によるデータ、オレンジ色は Argonne 国立研究所で得られていた測定値、また水色は Jyväskylä 大学の研究グループの実験結果に対応しています。

2025 年にフィンランド Jyväskylä 大学の研究グループ (以降 JYFL と呼ぶ) は、中性子過剰不安定ランタン同位体の精密質量測定から、ランタン同位体において従来の系統性から大きく外れる特徴的な  $S_{2n}$  の振る舞いを報告しました。図 1 の水色の  $S_{2n}$  プロットが JYFL による実験結果で、中性子数 93,94 に平坦な部分を持つ台形のような形になっています。これは中性子数が一つ増えるたびに原子核構造が大きく変化していることを示唆しており、また中性子数 94,95 間での  $S_{2n}$  の値の落差も大きなものとなっています。この結果は、ランタン同位体に特異的な原子核構造の可能性を示唆するものであり、原子核構造の理解に新たな議論を提起しました。この特徴的な振る舞いを検証する上で鍵となるのが、ランタン 149 ( $^{149}\text{La}$ 、中性子数 92) の質量です。 $^{149}\text{La}$  の質量は、ランタン同位体の  $S_{2n}$  の系統性を決める重要な量であり、その値が変わると、JYFL で示された特徴的な構造の見え方も大きく変わります。そのため、JYFL とは異なる生成方法で  $^{149}\text{La}$  を生成し、その質量を高い確度で測定することが重要でした。 $^{149}\text{La}$  のような短寿命不安定核の質量測定では、測定されたイオンが本当に  $^{149}\text{La}$  であるか、またどの原子核状態に対応しているかを確認することが不可欠です。特に、安定同位体から成る分子を  $^{149}\text{La}$  と誤認している可能性や、生成反応の違いによって異なる長寿命核異性体状態<sup>(※2)</sup> が生成される可能性を考慮する必要があります。本研究では、JYFL とは異なる生成方法であるカリホルニウム 252 およびキュリウム 248 の自発核分裂<sup>(※4)</sup> から  $^{149}\text{La}$  を生成し、質量測定とベータ崩壊測定を同時に行うことで、 $^{149}\text{La}$  の基底状態質量を高い確度で決定することを目指しました。

## 研究内容と成果

本研究では  $^{149}\text{La}$  の質量-半減期同時測定を  $\beta$ -TOF 検出器を飛行時間検出器として組み込んだ多重反射型飛行時間式(MRTOF)質量分光器を用いました。MRTOF 質量分光器は 10 ミリ秒程度の短い測定時間で複数の原子核の質量を同時に高精度で決定することができ、短寿命原子核

の精密質量測定に最適な装置です。

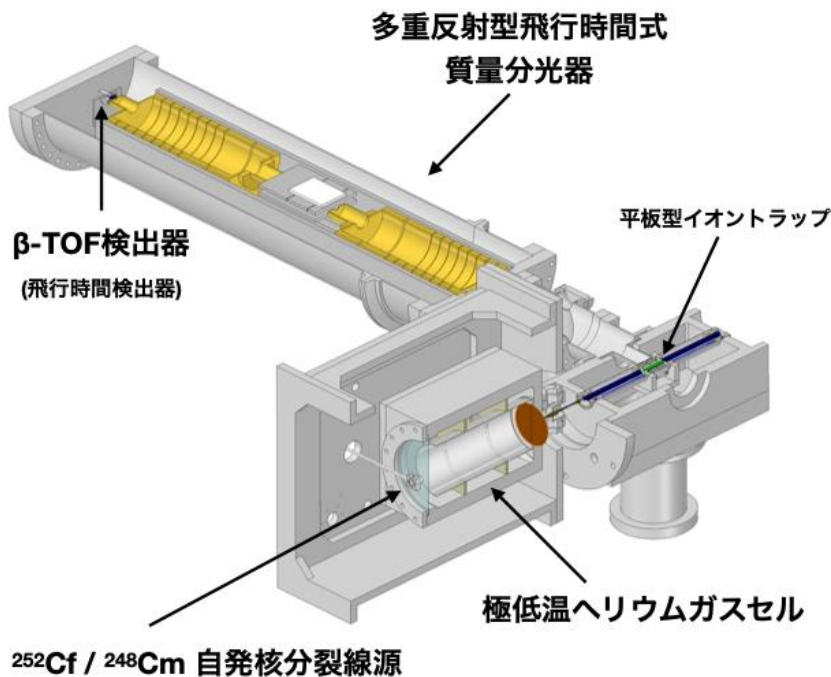


図 2 実験装置の概念図

実験は理化学研究所仁科加速器科学研究センター内において停止低速 RI 精密質量分析システム (CRISMAL) コラボレーションの下で共同運用されている実験装置群(図 2)を使用して行われました。これは MRTOF 質量分光器、極低温ヘリウムガスセル、およびイオントラップ群から構成されており、短寿命不安定同位体である  $^{149}\text{La}$  の生成にはカリホルニウム 252 およびキュリウム 248 の自発核分裂を使用しています。自発核分裂によって生成された高エネルギーの  $^{149}\text{La}$  イオンはガスセル内でガスとの相互作用によってエネルギーを失い、極低エネルギーのイオン・ビームに変換されます。ガスセルから引き出されたイオンは直線型イオントラップを通じて平板型イオントラップに送られ蓄積、冷却されます。十分に冷却されたイオンを高電圧で加速、MRTOF 質量分光器に入射し飛行時間を測定することで精密に質量を測定しました。また飛行時間検出器として  $\beta$ -TOF 検出器を使用することで、飛行時間と検出器に打ち込まれた不安定同位体イオンの  $\beta$  崩壊の同時測定を可能としています。

実験の結果、図 3 (a)に示すような飛行時間スペクトルが得られました。観測された  $^{149}\text{La}$  のピーク位置は、JYFL のデータから予測される位置よりも早い位置に現れました。これは、本実験で得られた  $^{149}\text{La}$  の質量が、JYFL のものよりも軽いことを示しています。

このピークが本当に  $^{149}\text{La}$  に由来するものかを確認するため、本研究では、飛行時間イベントと関連している  $\beta$  崩壊イベントを抽出しました。その結果、図 3 (b)に示すように典型的な  $\beta$  崩壊の時間スペクトルが得られました。これにより、観測されたイベントが安定同位体からなる分子ではなく、短寿命不安定核  $^{149}\text{La}$  に由来するものであることを確認しました。さらに、質量と半減期を同時に測定することで、観測された  $^{149}\text{La}$  が基底状態に対応することを高い確度で確認しました。

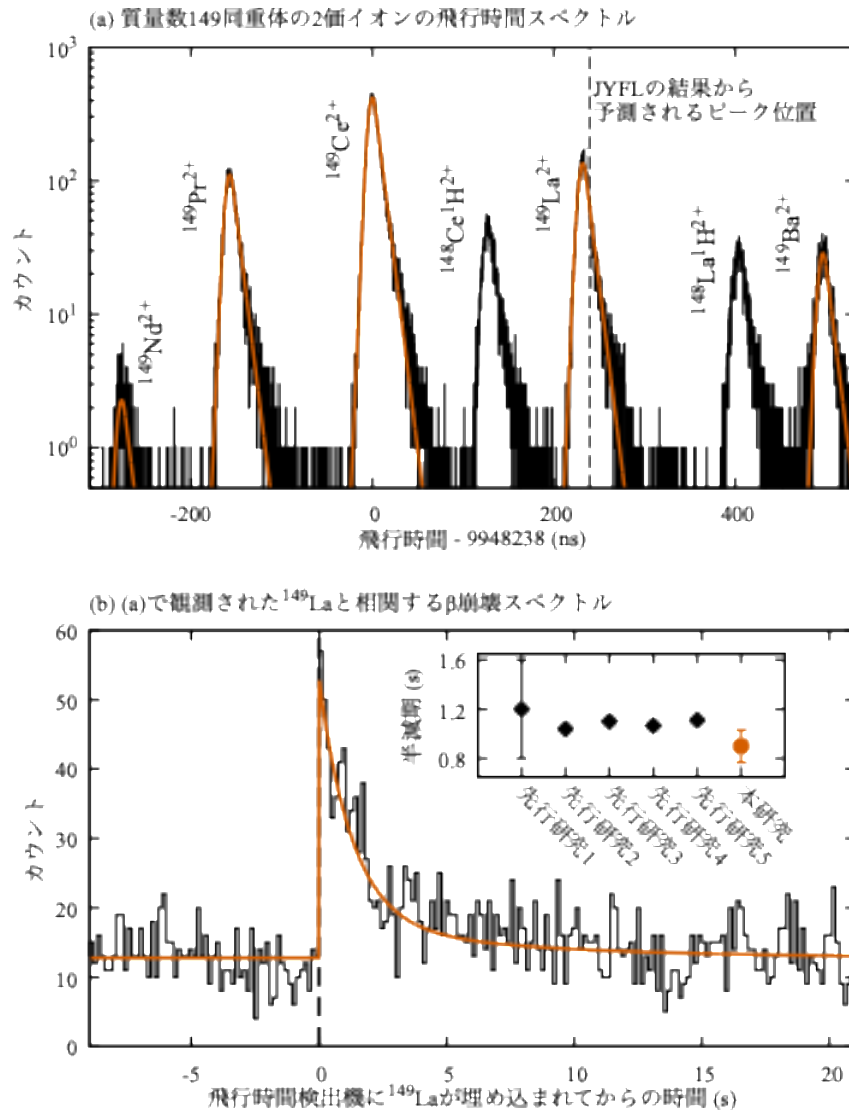


図 3 (a) 質量数 149 同重体 2 価イオンの飛行時間スペクトル。軽いイオンはより左側に、重いイオンはより右側にピークが現れます。縦の破線は JYFL の実験結果から予測される  $^{149}\text{La}$  のピーク位置を表していて、本研究ではそれより左側に測定結果が得られました。(b)  $^{149}\text{La}^{2+}$  イベントと関連する  $\beta$ 崩壊イベントの時間スペクトル。今回の測定で得られた半減期が先行研究による半減期測定の結果と合わせてプロットされています。(a) (b) とも橙色の線はフィッティングの結果を表しています。

本測定によって得られた  $^{149}\text{La}$  の質量値は、JYFL の値よりも約 200 キロ電子ボルト (=0.2 メガ電子ボルト) <sup>(※5)</sup> 軽く、JYFL で示唆された特徴的な  $S_{2n}$  の振る舞いが見られないことが分かりました。

また、同じ  $^{149}\text{La}$  について独立に得られていた測定値を確認したところ、米国 Argonne 国立研究所で自発核分裂により生成された  $^{149}\text{La}$  をペニングトラップ質量分析器で測定した値が、本研究の結果とよく一致していることも分かりました。この測定値は査読付きの論文として公表されたものではありませんが、本研究で得られた質量値が  $^{149}\text{La}$  の基底状態質量であるという解釈を支持するものです。

JYFL やこれまで実施されてきた  $^{149}\text{La}$  の半減期測定は、全てウラン同位体の誘導核分裂 <sup>(※6)</sup> を

生成法として採用しています。一方、本研究では自発核分裂から生成された  $^{149}\text{La}$  を測定しています。今回得られた半減期の値は誤差が大きく、明確に結論することはできませんが、これまで報告された半減期よりも短く、先行研究とは異なる状態を見ている可能性を示しています。すなわち、誘導核分裂と自発核分裂で  $^{149}\text{La}$  の異なる状態が生成されると仮定すると、本研究は  $^{149}\text{La}$  の基底状態を再決定したことになります。

## 本研究の意義

本研究では  $^{149}\text{La}$  の基底状態の質量値を明確に決定しました。これにより、先行測定から示唆されていたランタン同位体に特徴的な構造は見られないことを示し、ランタン同位体の構造に関する議論に新たな実験的根拠を与えました。質量-半減期同時測定が、短寿命原子核の状態を識別しながら質量を決定するための強力な手法であることを示しました。中性子分離エネルギーは宇宙での元素合成過程にも関わる重要な物理量であり、本成果は中性子過剰な原子核の性質を理解する上でも重要な手がかりとなります。

## 用語解説

### 1. 多重反射型飛行時間測定式 (MRTOF) 質量分光器

一对の静電イオンミラーで構成されておりイオンを一定のエネルギーで一定距離飛ばし、その飛行時間からイオンの質量を測定する装置。実際の測定ではイオンをイオンミラー内で数百回往復させ、飛行時間は 10 ミリ秒 (1 ミリ秒は千分の 1 秒) 程度になります。これにより一千万分の 1 程度の質量の違いを見ることが可能で、また同時に複数種類のイオンの測定を行うことができます。

### 2. 基底状態、核異性体状態

原子核は同じ陽子数と中性子数であっても多くの離散的なエネルギー状態を持ちます。その中で最も安定な状態は基底状態と呼ばれ、それよりもエネルギーが高く不安定なものを励起状態と呼びます。この励起状態の中で長い寿命を持つ準安定的な状態を核異性体状態と呼んでいます。また励起状態は励起エネルギー分だけ基底状態よりも重くなります。

### 3. 二中性子分離エネルギー

原子核から中性子を二つ取り出すのに必要なエネルギー。陽子数  $Z$  と中性子数  $N$  を持つ原子核の二中性子分離エネルギー ( $S_{2n}$ ) は

$$S_{2n}(N,Z) = M(N-2,Z) + 2M_n - M(N,Z)$$

で計算することができます。ここで  $M(N,Z)$  は原子核  $(N,Z)$  の質量、 $M_n$  は中性子の質量を表しています。ここより  $S_{2n}$  を求めるためには二つ隣の核種の質量値が必要となることが分かります。

### 4. 自発核分裂

重い原子核の一部は自発的に複数の分裂片に別れる自発核分裂を起こします。特にウランよりも重い原子核によく見られる崩壊様式です。

### 5. 電子ボルト

エネルギーの単位。1 電子ボルトは 1 個の電子が真空中で 1 ボルトの電位差で加速されたときに得るエネルギーを表します。1 キロ電子ボルト = 1,000 電子ボルト。1 メガ電子ボルト = 1,000,000 電子ボルト。

### 6. 誘導核分裂

何かしらの原子核反応、例えば陽子/中性子照射などによってウランなどの重い原子核を高い励起状態まで持ち上げ核分裂を起こす方法。不安定原子核の生成方法として広く使用されています。

## 7. The Atomic Mass Evaluation 2020 (AME20)

原子核の質量について実験データをもとに評価された値をまとめた論文、その2020年版。原子核質量の標準値として採用されることが多い。

## 謝辞

---

本研究は主に日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業 17H06090, 22H04946, 23K13132, および 23K13137 の助成を受けて行われました。

## 論文情報

---

### ・タイトル

New Ground State in  $^{149}\text{La}$  Removes Two-Neutron-Separation-Energy Anomaly in Lanthanum Isotopes

### ・著者

S. Kimura, M. Wada, H. Haba, Y. Hirayama, H. Ishiyama, Y. Ito, T. Niwase, M. Rosenbusch, P. Schury, H. Ueno, Y.X. Watanabe, and Y. Yamanouchi

### ・雑誌

Physical Review Letters **136**, 232501 (2026)

### ・DOI

10.1103/gvxl-vxd4

## お問い合わせ先

---

### <研究内容に関すること>

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所 和光原子核科学センター 教授 渡邊裕  
Tel: 048-466-1125  
e-mail: yutaka.watanabe@kek.jp

国立研究開発法人 理化学研究所  
仁科加速器科学研究センター 低速 RI ビーム生成装置開発チーム チームリーダー 石山博恒  
e-mail: hironobu.ishiyama@riken.jp

### <報道担当>

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

国立研究開発法人 理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247

e-mail: [ex-press@ml.riken.jp](mailto:ex-press@ml.riken.jp)