

PRESS RELEASE

2026年4月14日
理化学研究所、筑波大学
大阪大学、東北大学
高エネルギー加速器研究機構

電子を操って原子核の半減期を大きく変える

— 「電子架橋遷移」の存在を示す重要な証拠を発見 —

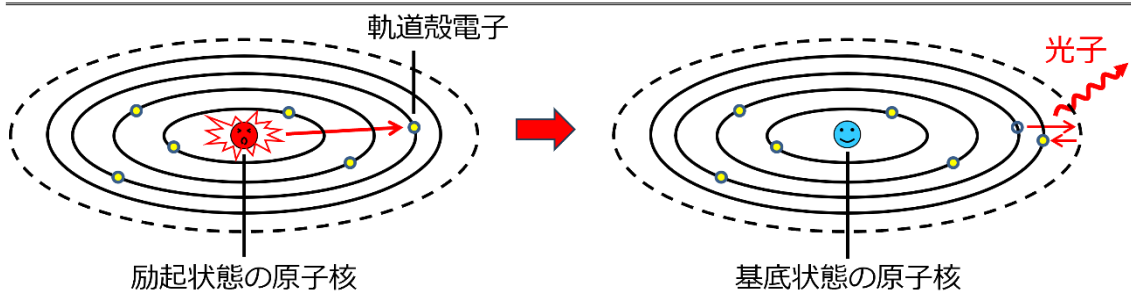
概要

理化学研究所（理研）仁科加速器科学研究センター核化学研究開発室の重河優大特別研究員（研究当時、現客員研究員、筑波大学数理物質系助教）、羽場宏光室長、光量子工学研究センター時空間エンジニアリング研究チームの山口敦史専任研究員、大阪大学大学院理学研究科の笠松良崇教授、東北大学先端量子ビーム科学研究センターの菊永英寿准教授、同金属材料研究所の白崎謙次講師（研究当時）、高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所の和田道治名誉教授らの共同研究グループは、原子核の周りにおける電子の数を変えて、励起状態のトリウム ^{229}Th 原子核の半減期を大きく変化させることに成功しました。

本研究成果は、未発見の核壊変過程（励起状態から基底状態へ脱励起する過程）である「電子架橋遷移^[2]」の直接観測に向けた大きな一歩となり、原子核時計^[3]の実現に向けた貢献も期待されます。

励起状態のトリウム ^{229}Th 原子核は、通常の原子核の 1,000 分の 1 以下である 8.4 eV^[4] という低い励起エネルギーを持ちます。8.4 eV は、トリウム原子の最も外側の軌道にある電子（価電子）の結合エネルギーと同程度です。そのため、価電子の数が変わると、励起状態のトリウム ^{229}Th 原子核の壊変過程が変化すると考えられてきました。壊変過程として、光子を放出する γ （ガンマ）線放出^[5] や電子を放出する内部転換^[6] が知られています。これらは多くの原子核で観測されている壊変過程ですが、トリウム ^{229}Th 原子核の場合には、原子核のエネルギーを電子の遷移と光子に変換する電子架橋遷移という新しい過程の存在が予想されてきました。今回、共同研究グループは、中性のトリウム原子から電子を 1 個取り除いた 1 価イオンの状態で、励起状態のトリウム ^{229}Th 原子核の半減期を測定しました。得られた半減期の値は 0.46 ± 0.08 秒で、中性のトリウム原子（内部転換で壊変）の 10 万分の 1 秒程度や 3 価のトリウムイオン（ γ 線放出で壊変）の 1,400 秒程度という半減期の値と大きく異なっており、電子架橋遷移の存在を強く示唆する結果となりました。

本研究は、科学雑誌『*Nature Physics*』オンライン版（4 月 14 日付：日本時間 4 月 14 日）に掲載されました。



電子架橋遷移の概要

背景

通常、原子核の励起エネルギーは数千～数百万 eV 程度ですが、トリウム 229 (原子番号 90、質量数 229) の原子核には、励起エネルギーがわずか 8.4eV のアイソマー^[7]が存在します。このアイソマーは、不安定な原子核状態(励起状態)であるため、より安定な状態(基底状態)に放射壊変します。8.4eV の励起エネルギーは、トリウム原子の最も外側の軌道にある電子(価電子)の結合エネルギー程度の大きさです。ほとんどの原子核では、核の半減期が電子の数や状態に応じて変化することはありませんが、トリウム 229 アイソマーの場合は、トリウム原子が持つ電子の数に応じて核壊変過程や半減期が変化します。例えば、トリウムが中性原子状態の場合、アイソマーは内部転換によって壊変し、その半減期は 10 万分の 1 秒程度です。一方、トリウムが 3 価イオンの状態の場合、アイソマーは γ 線放出によって壊変し、その半減期は 1,400 秒程度であることが知られています。

理論的な研究によると、トリウムの電子状態によっては、内部転換や γ 線放出とは異なる核壊変過程である電子架橋遷移が起こり、半減期も大きく変化し得ると予想されてきました。電子架橋遷移では、原子核の励起エネルギーが電子の遷移に使われるとともに、光子が放出されます。電子架橋遷移が起こる有力な候補が、1 価イオン状態のトリウム 229 アイソマーです。これまで、1 価イオン状態のアイソマーを生成することが難しく、半減期の測定に成功した例はありませんでした。本研究では、トリウム 229 の 1 価イオンをイオントラップ中で大量に生成する手法を新たに開発し、アイソマーの半減期の測定を試みました。

研究手法と成果

共同研究グループは、1 価イオン状態のトリウム 229 アイソマーを生成するための装置を開発しました(図 1)。トリウム 229 アイソマーの生成には、ウラン 233 (^{233}U) の線源を利用しました。ウラン 233 がアルファ壊変(ヘリウム 4 (^4He) の原子核の放出)すると、2% の割合でアイソマーのトリウム 229 (^{229}Th) イオンが生成されます。トリウム 229 イオンの集団を、ヘリウム (He) ガスとの衝突によって減速し、RF (ラジオ波) カーペット^[8]と呼ばれるイオン収集装置でイオンビームとして取り出し、イオントラップまで輸送しました。イオントラ

ップには、アルゴン (Ar) ガスと微量の一酸化窒素 (NO) ガスを導入しました。トリウム 229 イオンは最初 2 価イオン ($^{229}\text{Th}^{2+}$) の状態ですが、NO ガスとの電荷交換反応によって 1 価イオン ($^{229}\text{Th}^+$) に変換されます。

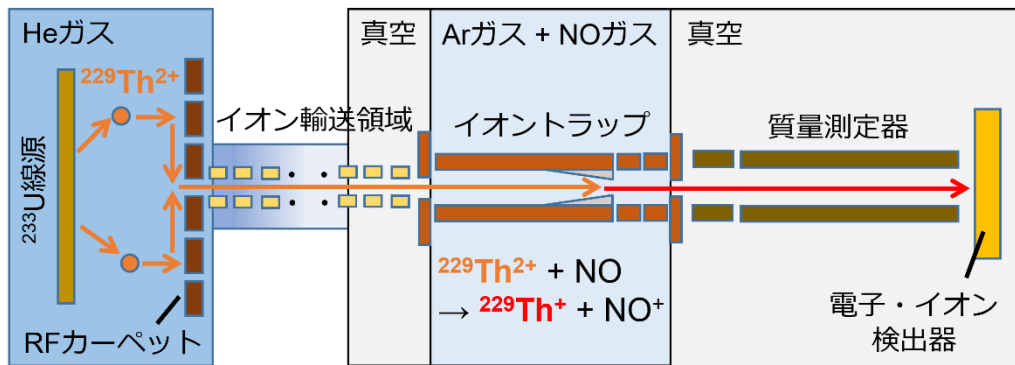


図 1 本研究で開発したトリウム 229 (^{229}Th) の 1 価イオン生成装置

ウラン 233 (^{233}U) 線源から引き出された ^{229}Th の 2 価イオン ($^{229}\text{Th}^{2+}$ 、2%がアイソマー) をイオントラップに捕捉し、一酸化窒素 (NO) ガスとの電荷交換反応を起こすことで 1 価イオン ($^{229}\text{Th}^+$) を生成した。

イオントラップ中で 1 価のトリウム 229 イオンが生成されたことを確認するため、イオントラップの後段に設置された質量測定器と電子・イオン検出器を用いて、イオンの質量電荷比^[9]を測定しました。イオンを NO ガスの存在下で 0.1 秒トラップした場合、トラップなしの場合に比べて、1 価のトリウム 229 イオンの量が 13 倍に増加しており、電荷交換反応による 1 価イオンの大量生成が確認されました (図 2)。

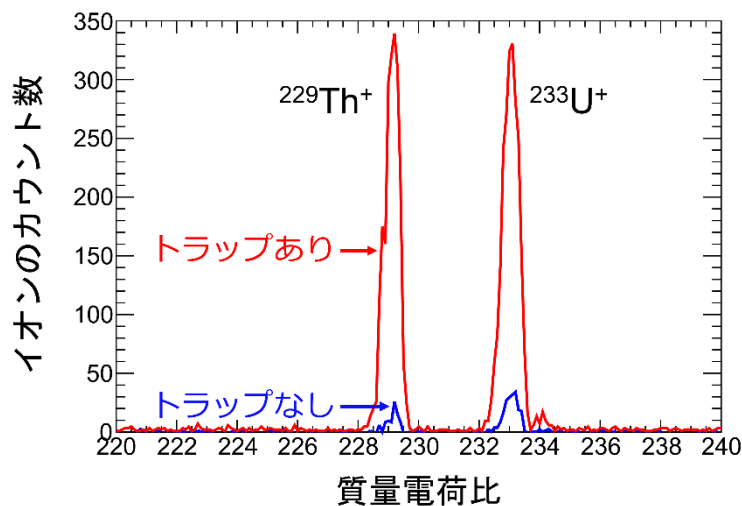


図 2 イオントラップから引き出されたイオンの質量電荷比の分布

イオンを 0.1 秒トラップしてから引き出した場合 (赤)、イオンをトラップせずに連続的に引き出した場合 (青) に比べてトリウム 229 の 1 価イオン ($^{229}\text{Th}^+$) の量が大幅に増大した。ウラン 233 線源からのアルファ線によって線源自身もイオン化され、ウラン 233 の 1 価イオン ($^{233}\text{U}^+$) もトラップから引き出された。

トリウム 229 のアイソマーを検出するため、1 価イオン状態のトリウム 229 を電子・イオン検出器へ輸送しました（図 1）。1 価イオンのトリウム 229 アイソマーは、検出器表面で中性原子に変わり、内部転換過程によって壊変します。その際に放出される内部転換電子の検出を試みました。その結果、内部転換による壊変に対応した 10 万分の 1 秒程度の半減期を持つ信号が検出されました（図 3）。一方、比較用に、天然に存在する長半減期のトリウム 232 (^{232}Th) の 1 価イオンで実験したところ、そのような信号は見られませんでした。従って、トリウム 229 アイソマーの信号を正しく検出できたことが分かりました。

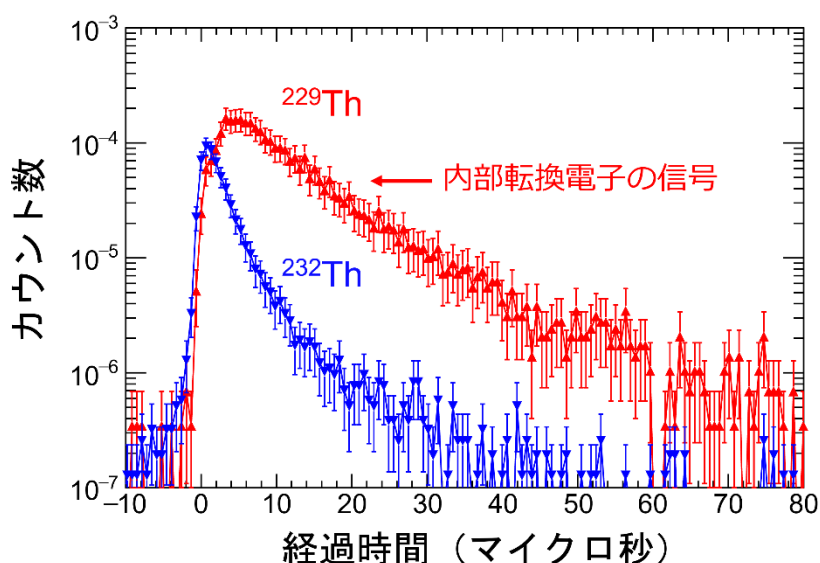


図 3 トリウム 229 アイソマーの内部転換電子の検出

トリウム 229 アイソマーが検出器に到着してからの電子信号の経時変化を測定したところ、内部転換による壊変に対応した 10 万分の 1 秒程度の半減期を持つ信号が観測された（赤線）。比較用に、トリウム 232 (^{232}Th) を検出器に引き出したところ、半減期の長い減衰信号は観測されなかった（青線）。

上記の結果から、イオントラップ中のトリウム 229 アイソマーの個数を、電子・イオン検出器によって数えられることが分かりました。そこで、イオンのトラップ時間を変えながら、アイソマーおよび基底状態のトリウム 229 の個数の変化をそれぞれ測定しました。基底状態のトリウム 229 については、イオンの個数がトラップ時間とともに増加し、ピークを迎えた後に減少する挙動を示しました（図 4 の青線）。これは、トリウムの 1 価イオンがトラップ中で電荷交換反応により生成され、分子との化学反応によって減少したことを示しています。

一方、アイソマーも基底状態と化学的性質が同じであるため、トラップ中での化学反応による個数変化は同じになるはずですが、曲線の形が基底状態とは大きく変化していました（図 4 の赤線）。この個数変化はアイソマーの原子核壊変によるものだと考えられ、1 価イオン状態のトリウム 229 アイソマーの半減期を 0.46 ± 0.08 秒と決定することができました。得られた半減期は、内部転換の半減期（10 万分の 1 秒程度）や γ 線放出の半減期（1,400 秒程度）とは大

大きく異なっており、新しい壊変過程の存在が示唆されました。また、電子架橋遷移の半減期の理論計算値とも矛盾がなく、1価イオン状態のトリウム 229 アイソマーは電子架橋遷移で壊変することが示唆されました。

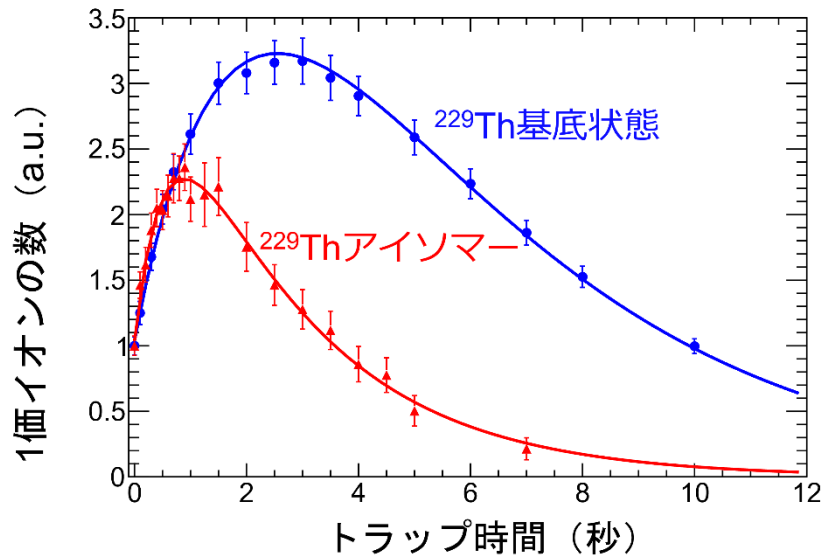


図4 イオントラップに捕捉された1価イオン状態のトリウム 229 の個数の経時変化

トラップ時間0秒のときの1価イオンの数を1に規格化している。アイソマー（赤）と基底状態（青）の個数の変化の仕方が大きく異なっていることが観測された。両者の差異を解析することで、1価イオン状態のトリウム 229 アイソマーの半減期を決定した。

今後の期待

本研究の結果は、電子架橋遷移の直接的観測に向けた大きな一歩となります。今後は、1価イオン状態のトリウム 229 アイソマーから放出される光子を測定することで、電子架橋遷移の直接的観測を目指します。さらに、放出された光子の波長を分析することで、電子架橋遷移の壊変機構の解明に取り組みます。

一方、基底状態のトリウム 229 原子核にレーザーを照射してアイソマーへ励起することで、既存の原子時計を超える精度を持つ「原子核時計」が実現できると期待されています。電子架橋遷移への理解を深めることで、レーザーで生成されたトリウム 229 アイソマーを素早く基底状態へ戻す手法の開発など、原子核時計の実現に向けた貢献も期待されます。

論文情報

<タイトル>

Lifetime of the singly charged ^{229}Th nuclear isomer

<著者名>

Yudai Shigekawa, Atsushi Yamaguchi, Katsuyuki Tokoi, Nozomi Sato, Hidetoshi Kikunaga, Kenji Shirasaki, Yoshitaka Kasamatsu, Michiharu Wada, Hiromitsu

Haba

<雑誌>

Nature Physics

<DOI>

10.1038/s41567-026-03251-1

補足説明

[1] トリウム 229

トリウムは原子番号 90 の元素。質量数 229 の同位体であるトリウム 229 の原子核は、基底状態からわずか 8.4 電子ボルト (eV) ([4]参照) 上に、準安定な励起状態を持つ。この励起状態にあるトリウム 229 原子核のことをトリウム 229 アイソマー ([7]参照) と呼ぶ。

[2] 電子架橋遷移

励起状態の原子核がより低いエネルギー状態へ移る過程の一種。原子核の励起エネルギーが原子の軌道殻電子の遷移に使われるとともに、光子が放出される。 γ 線放出 ([5]参照) 過程や内部転換 ([6]参照) 過程とは異なる高次の過程として理論的に予測されてきたが、実験による明確な観測例はない。

[3] 原子核時計

トリウム 229 原子核の基底状態とアイソマーの間の遷移周波数を基準とする時計。原子核遷移の周波数は環境ノイズの影響を受けにくいいため、既存の原子時計を上回る正確さを実現できると期待されている。トリウム 229 のアイソマーは通常の原子核に比べて励起エネルギーが非常に低いため、レーザーによる原子核遷移が可能となり、原子核時計の実現が期待される。

[4] 電子ボルト (eV)

エネルギーの大きさを示す単位で、電子 1 個が真空中で 1 ボルトの電位差で加速されたときに得るエネルギー。

[5] γ (ガンマ) 線放出

励起状態の原子核が、励起エネルギーを γ 線 (光子) として放出することで、より低いエネルギー状態へ移る過程。

[6] 内部転換

励起状態の原子核が、励起エネルギーを原子の軌道殻電子に受け渡すことで、より低いエネルギー状態へ移る過程。エネルギーを受け取った電子は、内部転換電子として原子の外へ放出される。

[7] アイソマー

比較的長い半減期 (およそ 10 億分の 1 秒以上) を持つ励起状態の原子核。

[8] RF (ラジオ波) カーペット

高圧のガス中に存在するイオンを効率よく収集し、微小な穴からイオンを引き出すための装置。本研究で用いられた RF カーペットは、プリント基板の中心に 0.3mm 程

度の穴が空いており、それを中心に多数の同心円状の電極が配置されている。電極に適切な高周波電圧をかけることで、電極付近に到達したイオンを中心の穴まで高効率かつ高速で輸送することができる。RF は Radio Frequency の略。

[9] 質量電荷比

統一原子質量単位（炭素 12 原子の質量の 12 分の 1）で表されるイオンの質量をイオンの電荷数で割った値。例えば、トリウム 229 の場合、1 価イオンでは 229.0、2 価イオンでは 114.5 となる。質量測定器では、質量電荷比の異なるイオンを分離することができる。

共同研究グループ

理化学研究所

仁科加速器科学研究センター 核化学研究開発室
 特別研究員（研究当時、現 客員研究員）
 重河優大 （シゲカワ・ユウダイ）
 （筑波大学 数理物質系 助教）
 室長 羽場宏光 （ハバ・ヒロミツ）
 研究パートタイマー I 佐藤 望 （サトウ・ノゾミ）
 光子工学研究センター 時空間エンジニアリング研究チーム
 専任研究員 山口敦史 （ヤマグチ・アツシ）

大阪大学 大学院理学研究科

教授 笠松良崇 （カサマツ・ヨシタカ）
 大学院生（研究当時） 床井健運 （トコイ・カツユキ）

東北大学

先端量子ビーム科学研究センター
 准教授 菊永英寿 （キクナガ・ヒデトシ）
 金属材料研究所 アルファ放射体実験室
 講師・室長（研究当時） 白崎謙次 （シラサキ・ケンジ）
 （現 大阪大学 放射線科学基盤機構 准教授）

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

名誉教授 和田道治 （ワダ・ミチハル）

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若手研究「イオンと分子の反応を利用したトリウム 229 核異性体の電子架橋遷移の観測（研究代表者：重河優大、JP20K14500）」、同基盤研究（B）「トリウム 229 核異性体の内部転換抑制手法の開発によるガンマ線放出過程の解明（研究代表者：重河優大、JP23K25904）」、同基盤研究（A）「レーザーによるコヒーレントな原子核操作の実現—原子核時計の創成と応用に向けて（研究代表者：吉村浩司、JP21H04473）」「原子核時計実現にむけたトリウム 229 イオンのレーザー冷却（研究代表者：山口敦史、JP23H00094）」、同基盤研究（S）「原子核時計：革新的プローブによる基礎物理の探究（研究代表者：吉村浩司、JP25H00397）」、

科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST「原子核時計が切り拓く時空計測フロンティア（研究代表者：吉村浩司、JPMJCR24I6）」による助成を受けて行われました。本研究で使用したウラン 233 は、日本原子力研究開発機構と東北大学金属材料研究所共同研究（17K0204、17F0011、18F0014）による、ウラン 233 共同利用プロジェクトから提供されたものです。

発表者・機関窓口

<発表者>

大阪大学 大学院理学研究科
教授 笠松良崇 （カサマツ・ヨシタカ）

<機関窓口>

大阪大学 理学研究科 庶務係
Tel: 06-6850-5280
Email: ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp

プレスリリース時には、関連する機関の問い合わせ先も記載しておりますが、ホームページ掲載時には、本学理学研究科関係者のみ掲載としております。
