

令和 2 年 11 月 11 日

報道関係者各位

サリー大学
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
理化学研究所

中性子過剰なタンタル核異性体で探る原子核形状の多様性 －原子核構造の研究から重元素合成の起源天体解明に迫る－

本研究成果のポイント

○タンタル^{※1} の中性子過剰な短寿命核^{※2} (^{187}Ta) の核異性体^{※3} ($^{187\text{m}}\text{Ta}$) が崩壊時に放出するガンマ線を精密に測定し、その崩壊寿命 (7.3 秒) を決定しました。また、 $^{187\text{m}}\text{Ta}$ が、ラグビーボールのような原子核形状を保持しながらよりエネルギーの低い状態に崩壊することを明らかにしました。

○従来の装置の技術では測定困難だった高融点元素^{※4} のタンタル短寿命核を、高純度 $^{187\text{m}}\text{Ta}$ ビームとして引き出すことのできる KISS 装置^{※5} の活用がこの研究の成功の鍵となりました。

○KISS 装置での今後の研究進展によって、核異性体の核構造研究が進展するとともに、核異性体が天体内部での重元素合成^{※6} に及ぼす影響が明らかになるでしょう。

【概 要】

イギリス・サリー大学、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 (WNSC)、理化学研究所 (理研、埼玉県和光市) 仁科加速器科学研究センターを中心とする国際共同研究グループ[※]は、理研の重イオン加速器施設「RI ビームファクトリー (RIBF)」^{※7} に設置した、WNSC の共同利用元素選択型質量分離器 (KISS 装置) を用いて、地上に存在する安定なタンタル原子核 (^{181}Ta) よりも中性子が 6 個多い中性子過剰で短寿命なタンタル核異性体 ($^{187\text{m}}\text{Ta}$) の生成・分離・観測に成功しました。

$^{187\text{m}}\text{Ta}$ の崩壊時に放出されるガンマ線や特性 X 線 (各元素に特有のエネルギーを持ちます) を検出することで、核異性体の寿命を決定し、原子核の形状がプロレート変形 (ラグビーボールのような形) をしていることを初めて突き止め、その形状を保持したまま、よりエネルギーの低い基底状態 (各原子核で最もエネルギーの低い状態) に変化していることを明らかにしました (このように、よりエネルギーの低い状態に変化することを「崩壊」

と言います)。

研究対象となった ^{187m}Ta を含めて、原子番号 $Z=70-78$ 程度、中性子数 $N=110-126$ までの領域は金や白金元素を生み出した重元素合成の源とも考えられており、ラグビーボール型(プロレート変形)やパンケーキ型(オブレート変形)の形状をもつ長寿命な核異性体が数多く存在すると予想されています。このような長寿命な核異性体が重元素合成に及ぼす影響を定量的に理解することは、天体の中でどのようにして金・白金などの重元素が誕生したのかという謎の解明に繋がっています。本研究は、その先駆けともいえます。

本研究の成果は、物理学の国際的な専門誌である「Physical Review Letters」誌に11月6日(米国東部時間)掲載されました。

【背景】

複数個の陽子と中性子から構成されている原子核は、どのような形をしているのでしょうか？原子核は陽子数や中性子数が魔法数^{*8}に近いと、球形に近い形をしています。魔法数から離れるにつれて、ラグビーボールのような形状(プロレート変形)をした原子核が多数存在すること、たまにパンケーキのような形状(オブレート変形)をした原子核も存在することが分かってきました。理論予測によると重い原子核では洋なしやバナナのような特殊な面白い形状をした原子核も存在すると考えられています(図1^{*9})。

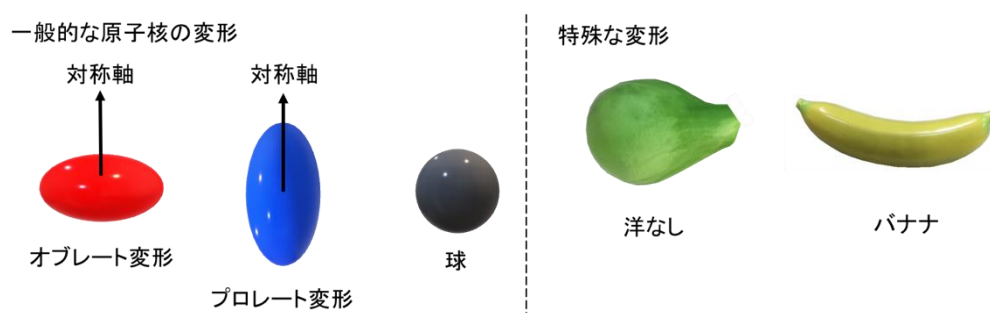


図1：様々な原子核の形状。

今回の研究対象である高融点元素が存在する原子番号 $Z=70-78$ 程度、中性子数 $N=110-126$ の短寿命核に注目すると、中性子数が増えるに従ってプロレート変形からオブレート変形に、そして球形に変化することが原子核実験と理論から分かっています。同じ原子核でも、余分に持っているエネルギー量(励起エネルギー)に応じてプロレート変形や、オブレート変形することが発見されています。このようなエネルギー量の高い状態(励起状態)にある短寿命核は、より安定な基底状態に向かってガンマ線を放出して崩壊します。ガンマ線のエネルギーや強度、その崩壊順序の測定(崩壊様式測定)から短寿命核の形状とその変化を調べることができます。

通常、崩壊先と崩壊後の状態で短寿命核の性質(形状・スピン^{*10})が良く似ている場合、それらの性質の変化は僅かなので、1000兆分の1秒という非常に短い寿命で崩壊します。しかし、崩壊前後で短寿命核の性質が大きく変化する場合、なかなか崩壊することができず、10億分の1秒から億年の寿命を持つ準安定な状態が存在します。その状態を核異性体と呼びます。核異性体の寿命測定から、短寿命核の性質が大きく変化するターニングポイントを知ることや、核異性体を介してより安定な状態に向かってどのように形状が変化するか、原子核の構造を研究することができます。

【研究内容と成果】

本実験は2020年3月、理研仁科加速器科学研究センターのRIBFのリングサイクロン（RRC）で加速された安定核キセノンビーム（ ^{136}Xe ）と、KEK和光原子核科学センターが開発したKISS装置を用いて行われました。

約980MeV（メガ電子ボルト）に加速したキセノンビーム（ ^{136}Xe ）を、KISS装置内に設置したタングステン（安定 $^{182},^{183},^{184},^{186}\text{W}$ 同位体）標的に照射して、多核子移行反応^{*11}でタンタルの核異性体（ $^{187\text{m}}\text{Ta}$ ）を生成します。多核子移行反応で生成された原子核だけが一気圧のアルゴンガスで満たされた小さな箱（ドーナツ型アルゴンガスセル、図2参照）に打ち込まれます。図2で黄色丸が電気を帯びていない ^{187}Ta 短寿命核を示しており、黒矢印がアルゴンガスの流れに沿って輸送されている様子を表しています。

ドーナツ型アルゴンガスセル

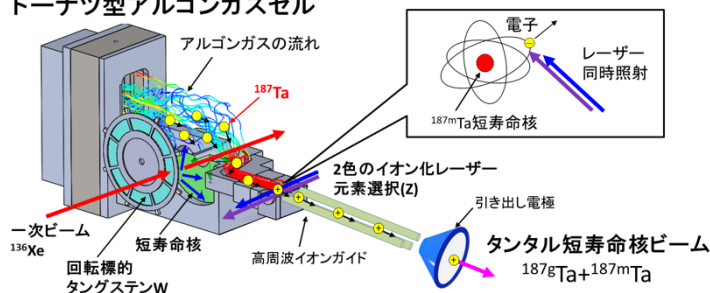


図2：一気圧のアルゴンガスで満たされたドーナツ型アルゴンガスセル。多核子移行反応で生成された $^{187\text{m}}\text{Ta}$ 短寿命核を捕集して、レーザー共鳴イオン化法で元素を選択できます。

その後、ガスセル内レーザー共鳴イオン化法^{*12}を用いることで、従来の装置ではイオン化困難である高融点元素のタンタル短寿命核イオン（ $^{187}\text{Ta}^+$ ）を生成して、20 keV（キロ電子ボルト）のエネルギーを持つイオンビームとして引出します。そこから双極電磁石の磁場を利用して、質量数187のタンタル同位体だけを検出器まで輸送することが出来ます（図3参照）。ただし、基底状態 $^{187\text{g}}\text{Ta}$ は核異性体 $^{187\text{m}}\text{Ta}$ よりも約0.001%だけ軽いいため、両方が混じったビームとして、KISS装置下流に設置した放射線検出器（または精密質量測定装置）に輸送されます。

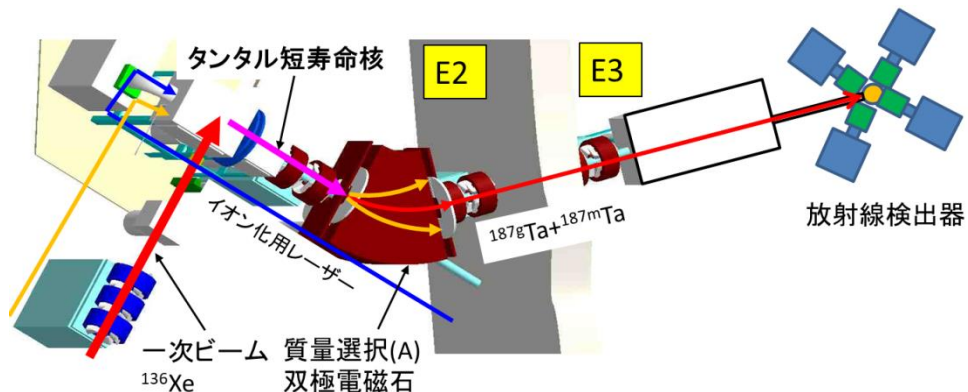


図3：KISS装置の概略図。

本実験では、 $^{187\text{g}}\text{Ta}$ および $^{187\text{m}}\text{Ta}$ の崩壊時に放出される放射線（ガンマ線、ベータ線^{*13}、内部転換電子^{*14}、特性X線）を放射線検出器で検出しました。さらに図4に示したように、KISS装置から引出した $^{187\text{m}}\text{Ta}$ ビームをON/OFFすることで、 $^{187\text{m}}\text{Ta}$ から放出された放射線の時間分布を測定しました。この結果から、 $^{187\text{m}}\text{Ta}$ の崩壊寿命を7.3(9)秒と決定できました。

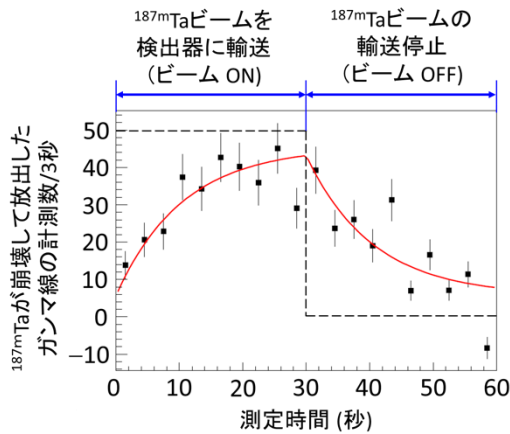


図4：今回の実験で測定した ^{187m}Ta の寿命測定の実験データ。KISS装置から引出した ^{187m}Ta ビームを放射線検出器に30秒間輸送（ビームON）し、その後、30秒間輸送停止（ビームOFF）、というサイクルを数百回繰り返しながら、 ^{187m}Ta が崩壊時に放出する放射線の時間分布を測定することで、7.3(9)秒と精度良く寿命を決定することができました。

データ解析から導出した寿命およびガンマ線のエネルギーとその放出順序を原子核理論と比較することで、 ^{187m}Ta のスピンの対称軸^{※9}に向けたプロレート変形核であること、ガンマ線を放出してエネルギーが低くなるにつれてスピンの向きが倒れて原子核の回転軸^{※9}に近づいて行くことがわかりました（図5参照）。 ^{187m}Ta が約7秒という長寿命をもつ理由は、スピンの向きが上方向で原子核全体が回転していない状態から、スピンの横方向に倒れて原子核全体が集団で回転運動している状態へ、と原子核構造が大きく変化するためだと考えられます。また今回の崩壊様式から、より中性子過剰なタンタル短寿命核の基底状態では原子核形状がプロレート変形からオブレート変形に形状変化する兆候を見つけました。

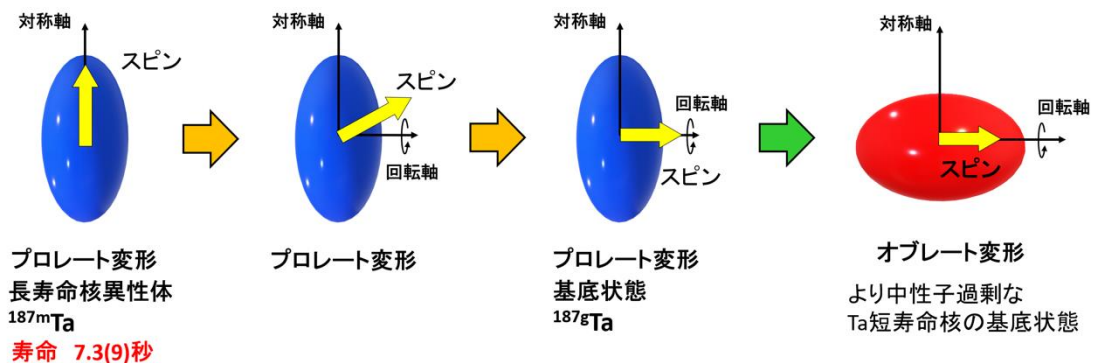


図5： ^{187m}Ta はプロレート変形したまま、ガンマ線を放出して基底状態に崩壊します。崩壊が進むにつれてスピンの向きが倒れていきます。オレンジの矢印は崩壊毎に核構造が変化している様子を表しています。

今回の結果から、本研究グループが開発してきたKISS装置では、高融点元素で生成困難な中性子過剰核でも多核子移行反応とレーザー共鳴イオン化法を組み合わせることで高純度イオンビームとして供給可能であること、本研究グループの開発した放射線検出器を用いることで詳細な原子核構造研究が可能であること、を示すことができました。

【本研究の意義、今後への期待】

これまで生成することが困難と考えられていた原子番号Z=70-78の高融点元素の中性子過剰核を、KISS装置にて供給し詳細な原子核研究を展開できることを示すことができました。

本研究では、 ^{187m}Ta 核異性体を生成し、主にベータ・ガンマ崩壊核分光検出器を用いて、寿命や崩壊様式を測定することで、その形状・核構造の変化を調べました。研究対象となった ^{187m}Ta を含めて、原子番号Z=70-78程度の高融点元素領域では、今回見出されたような長寿命な核異性体が数多く存在することが予言されており、その存在が天体における重元

素合成過程にも影響を与えうることが示唆されています。今回の核構造研究の手法以外にも KISS 装置では、放射線検出器を用いた基底状態のベータ崩壊寿命、精密質量測定装置を用いた原子核の精密質量測定、更にはレーザー共鳴イオン化時にレーザー波長を走査して分光することで可能となる原子核形状の探索から、これらの未開拓領域の核異性体を含む中性子過剰核に対して多角的に原子核の構造研究を行うことができます。今後の研究進展によって、核異性体の核構造研究とともに核異性体が重元素合成に及ぼす影響を明らかにし、さらには重元素を合成する爆発的天体環境の解明に迫るでしょう。

※ 国際共同研究グループ

- ・サリー大学
- ・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
- ・理化学研究所 仁科加速器科学研究センター
- ・北京航空航天大学
- ・オーストラリア国立大学
- ・筑波大学
- ・ドイツ重イオン研究所 (GSI)
- ・アルゴンヌ国立研究所
- ・韓国基礎科学研究施設 (IBS)
- ・北京大学

【用語解説】

※1. タンタル

原子番号 $Z=73$ の重い元素（ここでは原子番号 60 以上を指しています。）で、非常に高い融点（ 3017°C ）をもちます。そのため、タンタルはジェットエンジンの部品にも使われています。 ^{187}Ta は質量数 187 のタンタル同位体です。

※2. 中性子過剰な短寿命核（中性子過剰核）

身の回りに存在する安定な原子核よりも中性子の数が多い原子核のことを中性子過剰な原子核といいます。中性子が多く不安定なため、ある有限の時間で壊れます。そのため、これらの原子核のことを短寿命核といいます。

※3. 核異性体

同じ原子核でも、その核構造によって最も安定なエネルギー準位（基底状態：各原子核で最もエネルギーの低くて安定な状態）の他に、ある程度の寿命を持つ準安定な励起エネルギー準位（基底状態よりもエネルギーが高い状態）が存在する場合があります。この準安定な状態の原子核を核異性体と呼びます。

※4. 高融点元素

ここでは融点が 2000 度以上の元素を高融点元素と呼びます。タンタルのような高融点元素は、従来のイオン生成装置であるイオン源からビームとして引出すことが困難なため、安定核の近傍の短寿命核の実験データしかありません。

※5. 元素選択型質量分離器 (KEK Isotope Separation System : KISS 装置)

KEK が、理研に和光原子核科学センター (Wako Nuclear Science Center:WNSC) を設置して開発した、アルゴンガスセル中で捕集した種々の短寿命核から興味のある一種類の原子核を選択可能な装置で、国内外の研究者の共同利用に供しています。レーザー共鳴イオン化で元素 (原子番号 Z) 選択し、双極電磁石の磁場で原子核質量 (A) を選択します。これによって、一種類の原子核だけイオンビームとして引出して、原子核実験に利用できます。

※8. 魔法数

原子核を構成する陽子や中性子の数が 8、20、28、50、82、126 に一致するときに原子核は周囲の原子核よりも比較的安定な性質を持つことから、これらの数を「魔法数」と呼びます。

※6. 重元素合成過程

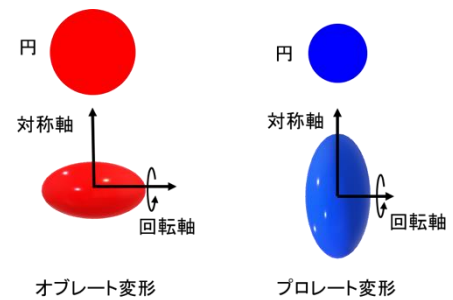
原子核が崩壊するよりも早く中性子を捕獲して重い元素を合成する過程 (r 過程) により鉄より重い元素の約半分が生成されました。II 型超新星爆発や中性子星合体のような中性子が高密度状態にある爆発的天体環境下で起こると考えられています。しかし、金・白金といった重い元素 (原子番号 60 以上) を合成する天体環境は多くの謎につつまれています。これらの重い元素を生成する過程で、たくさんの種類の短寿命核が生成されます。これらの短寿命核の性質、どのような形状をしているのか、長寿命核異性体が存在するのか、どのように壊れるのか、を知ることが、重元素合成の天体環境の謎を解き明かす鍵となります。長寿命核異性体を含む短寿命核の特異な核構造が、天体における重元素合成過程にどのような影響を与えるのか、興味が持たれています。

※7. RI ビームファクトリー (RIBF)

理研仁科加速器科学研究センターが有する、水素からウランまでの全元素の短寿命核 (RI) を世界最大強度のビームとして発生させ、それを多角的に解析・利用することにより、基礎から応用にわたる幅広い研究と産業技術の飛躍的発展に貢献することを目的とした次世代加速器施設。施設は、RI ビームを生成する「RI ビーム発生系施設」と、生成された RI ビームの多角的な解析・利用を行う「基幹実験設備」で構成されています。RI ビーム発生系施設は 2007 年 3 月に完成しました。RI ビームは、原子核の構成メカニズムおよび元素の起源の解明に有用であるとともに、RI 利用による産業発展に寄与することが期待されています。そのため、ドイツ、アメリカなど世界の主だった重イオン加速器施設でも次世代加速器施設の整備が計画され、国際的にも熾烈な開発競争を展開しています。

※9. 対称軸と回転軸

オブレート変形やプロレート変形した原子核には対称軸と回転軸があります。対称軸の方向から見ると、原子核は円形をしています。また変形した原子核は全体として回転軸の周りを回転運動しています。



※10. スピン

原子核や原子などの「方向」を定義する物理量として、「スピン」という自転しているかのような性質があります。

※11. 多核子移行反応

加速した原子核(入射核)を静止した原子核(標的核)に衝突させて2つの原子核の間で複数の陽子や中性子を移行させる反応。反応により入射核から生成された原子核を入射散乱核、標的核から生成された原子核を標的散乱核と呼びます。

※12. レーザー共鳴イオン化法

電氣的に中性な原子には、原子番号と同じだけの電子が原子核のまわりを運動しています。電子を一つ剥ぎ取ると中性原子はイオンとなり、電場や磁場を使ってその運動を制御することが可能となります。一番外側を運動している電子を剥ぎ取るエネルギーを第一イオン化エネルギーと呼びます。タンタルの場合は 7.40 eV(電子ボルト)になり、このエネルギーに相当するレーザーを照射して原子が光を吸収するとイオン化します。一本(一色)のレーザーで 7.40 eV を作るのは困難なため、KISS 装置では二本(二色)のレーザーを使ってイオン化しています。原子の基底状態から元素固有の励起状態へレーザー照射により電子を移動させ、2本目のレーザー照射で第一イオンエネルギーよりも高いエネルギーを与えると、興味のある元素だけを選択的にイオン化できます。この手法をレーザー共鳴イオン化法と呼びます。

※13. ベータ線

中性子過剰な原子核内の中性子が崩壊する際に放出する高エネルギーの電子のことを「ベータ線」と呼びます。

※14. 内部転換電子

通常、原子番号の数だけの電子が原子核の周りを運動しています。タンタルの場合は、73個の電子が、 ^{187}Ta 短寿命核の周りを運動しています。原子核の励起状態がガンマ線を放出して、よりエネルギーの低い状態になります。その際に、ガンマ線を放出する代わりに、相当するエネルギーを原子核のすぐ近くを運動している電子に与えることがあります。この電子を内部転換電子と呼びます。内部転換電子が放出された後、その電子が存在した場所に、タンタルの周りを運動している別の電子が余分な運動エネルギーを特性 X 線として放出して移動します。