

【リリース日時】

令和3年8月31日午後2時

【解禁日時】

令和3年9月1日午前0時

【本件リリース先】

文部科学記者会、科学記者会、筑波研究学園都市記者会、九州大学記者クラブ



理化学研究所



九州大学  
KYUSHU UNIVERSITY

令和3年8月31日

報道関係者各位

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  
国立大学法人九州大学

## 超重元素の初めての精密質量測定に成功 ～ 新元素の新しい原子番号決定法の証明 ～

### 本研究成果のポイント

- ・初の超重元素ドブニウム同位体の精密質量測定に成功
- ・新規発明した $\alpha$ -TOF検出器で希少事象でも確実な同定可能に
- ・新超重元素の原子番号の確実な同定法検証

### 【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(WNSC)、国立研究開発法人理化学研究所(理研、埼玉県和光市)仁科加速器科学研究センター、九州大学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)」の気体充填型反跳核分離器(GARIS-II)と多重反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF)<sup>(※1)</sup>を用いて、原子番号105番の超重元素<sup>(※2)</sup>ドブニウム同位体 $^{257}\text{Db}$ の質量を精密に測定することに成功しました。これは、超重元素の存在理由を解明する第一歩となる研究です。

原子番号(=陽子数)が大きい超重元素は、正の電荷を持つ陽子間の反発力が大きく、どこまで原子番号の大きい元素が存在できるか分かっていないため、新元素の探索が続けられています。一方、なぜ存在できるかを解明するには、原子核の結合エネルギーの系統的研究が鍵となり、そのためには超重元素同位体の質量をくまなく精密測定することが必要です。

理化学研究所の加速器施設において核融合反応で生成されたドブニウム同位体( $^{257}\text{Db}$ )は、研究グループが開発したMRTOF質量分光器と $\alpha$ -TOF検出器を用いることで、一日に2個程度しか観測できない稀な事象にも関わらず、質量を1/100万の相対精度で決定できました。これは、超重元素同位体を直接質量測定した世界で初めての実験です。また、今回の測定結果から、超重元素領域の原子核の原子番号を決定するには最低2事象を観測できれば良いことも実証しました。

本研究の成果は、物理学の国際的な専門誌である「Physical Review C, Letter」に8月31日（米国東部時間）に掲載予定です。

## 【背景】

原子番号が104以上の元素の呼称である「超重元素」は、より原子番号の大きな新元素の探索が続けられており、現在118番のオガネソンまで確認されています。超重元素のように原子番号の大きな（陽子の数が多い）原子核は、正の電荷を持つ陽子間の電気的な反発力が大きく、核力による引力との絶妙なバランスの上でどうにか存在できている状態なのです。原子核が単純に一様な球形だとすると、原子番号92のウランでさえ安定に存在できないはずなので、原子番号が何番までの元素が実際に存在できるかの限界を探ることは大変重要です。さらに、なぜウランや超重元素が存在できるのかを解明するためには、原子核がどれだけ強固に結合しているかを表す、結合エネルギーを系統的に調べるのが極めて有効です。

原子の質量は、一般にその構成要素である陽子・中性子・電子をそれぞれ独立に測った値より1%程度軽くなっています。その質量「欠損」が、アインシュタインのエネルギーと質量の等価性の式 $E=mc^2$ であらわされる原子の全結合エネルギーに相当します。超重元素同位体の質量を精密に測定することで、その結合エネルギーを決定することができ、超重元素が存在できる理由を調べる重要な手がかりとなるのです。

現在確認できている超重元素よりもさらに重い領域に、より安定で寿命の長い原子核があると予言されており、「安定の島<sup>(※3)</sup>」と呼ばれています。この島がどこにあるか、どれくらい安定なのかを予測する精度を上げるためにも、超重元素同位体の質量をくまなく測定することが必要です。

質量は原子核に固有の値なので、原子核の種類を同定する「指紋」にもなります。実際、原子番号114-118番の新元素の同定には、従来の基準の同定法が適用されておらず、より正確な同定法として、精密質量測定が期待されています。これは、今後発見されるはずの、より重い原子核においては一層重要となる実験方法です。

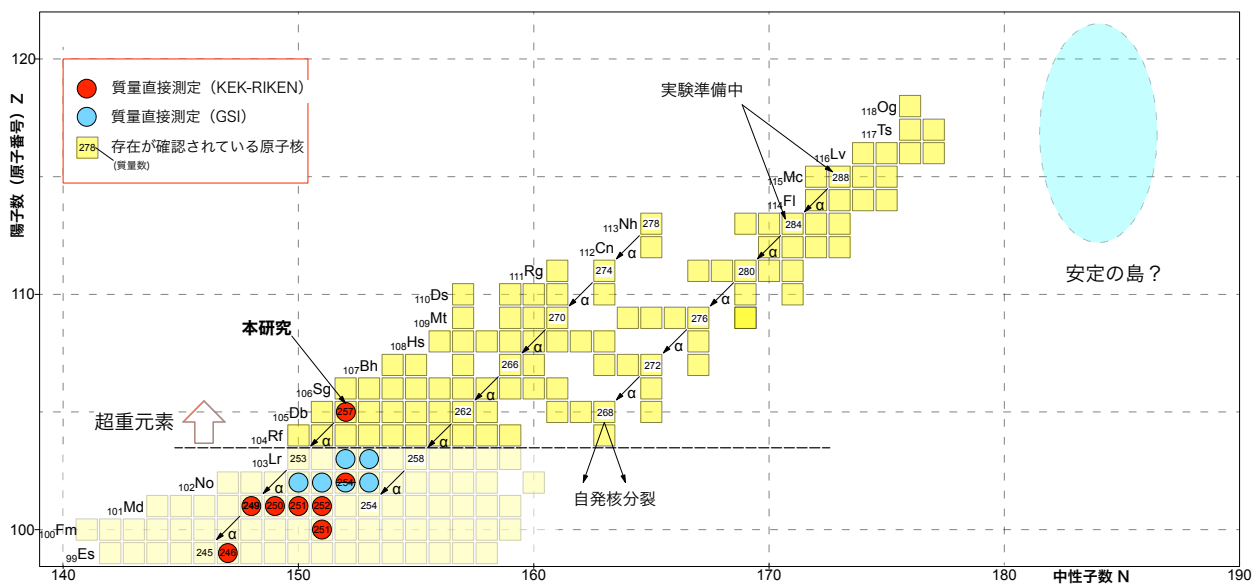


図1 超重元素領域の原子核の地図（核図表）

原子番号104以上の元素は超重元素と呼ばれています。原子番号99以上の重元素では、ドイツGSIのグループによるノーベリウム(No)とローレンシウム(Lr)の同位体と、本研究グループによるメンデレビウム(Md)、フェルミウム(Fm)、アインスタイニウム(Es)の計12同位体のみが直接質量測定されていました。本研究では初めて原子番号105のドブニウム同位体( $^{257}\text{Db}$ )の直接質量測定に成功しました。質量測定のための飛行時間検出器に飛来した $^{257}\text{Db}$ イオンは、その後連続的にアルファ崩壊して $^{253}\text{Lr}$ ,  $^{249}\text{Md}$ ,  $^{245}\text{Es}$ に到達します。より中性子数が多いニホニウム、モスコビウム<sup>(※4)</sup>同位体を次に測定しようと準備を進めています。

## 【研究内容と成果】

本実験は、2020年1月18日から24日にかけて、理研仁科加速器科学研究センターのリングサイクロトロンと、反応生成物と一次ビームを分離するGARIS-II装置、研究グループが開発した、高速イオンを停止してイオントラップに集めるガスセル装置と質量測定をするMRTOF質量分光器からなるSHE-Mass-II装置（超重元素質量測定装置）を用いて行われました。

リングサイクロトロンで306 MeV(メガ電子ボルト)に加速したバナジウム( $^{51}\text{V}$ )ビームを、GARIS-II装置内に設置した鉛( $^{208}\text{Pb}$ )回転標的に照射し、融合反応でドブニウム同位体 $^{257}\text{Db}$ を生成しました。そのドブニウム同位体イオンは、GARIS-IIによってビームと分離されますが、イオンビームの速度が光の1/10もの高速なので精密測定には適していません。そこで、ヘリウムを充填した冷凍ガスセル中で一旦停止させます。ヘリウムガス中で3価のイオン( $^{257}\text{Db}^{3+}$ )として停止したドブニウムは、セル内に配置した高周波カーペットで効率よく集められ、イオントラップ中に数ミリ秒蓄積し冷却してからMRTOF質量分光器に打ち出して質量測定しました。

(図2)

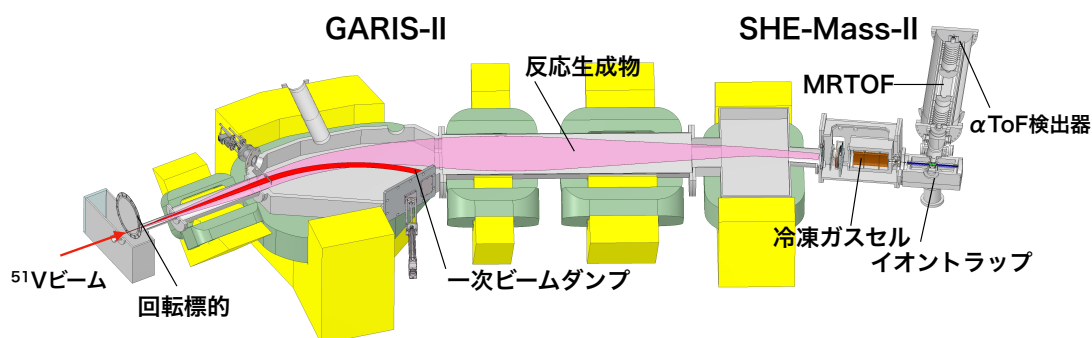


図2 実験装置俯瞰図

理化学研究所の加速器施設の気体充填型反跳核分離器(GARIS-II)に設置した超重元素質量測定器(SHE-Mass-II)を使用しました。バナジウム 51 ビームを回転標的にセットした鉛 208 標的に照射してドブニウム同位体を生成し、GARIS-II によって一次ビームを選り分け、ドブニウム同位体などの反応生成物を SHE-Mass-II に導きました。

MRTOF 質量分光器 (図 3) は一対の電氣的なミラーで構成されています。ドブニウム同位体イオン( $^{257}\text{Db}^{3+}$ )はその中を 1/100 秒かけて 300 周回往復し、その総飛行時間と、同じく 300 周回飛行させた参照のルビジウムイオン( $^{85}\text{Rb}^{+}$ )の飛行時間との比から質量を決定しました。等しいエネルギーで等しい距離を飛行した場合、飛行時間は、イオンの質量と荷電の比( $m/q$ )の平方根に比例します。一方、 $^{257}\text{Db}^{3+}$ は一日に 2 個しか観測されない稀

な事象なので背景事象との区別が重要です。 $\alpha$ -TOF 検出器 (図 4) は、イオンが到着した時の時刻を測る通常の機能に加えて、検出器に打ち込まれた  $^{257}\text{Db}$  が、順次  $^{253}\text{Lr}$ ,  $^{249}\text{Md}$ ,  $^{245}\text{Es}$  にアルファ崩壊する際に発生するアルファ線のエネルギーと、イオンが到着した時刻からの遅れ(崩壊時間)を測定することができます。これによって背景事象と真の事象を明確に区別することができます。

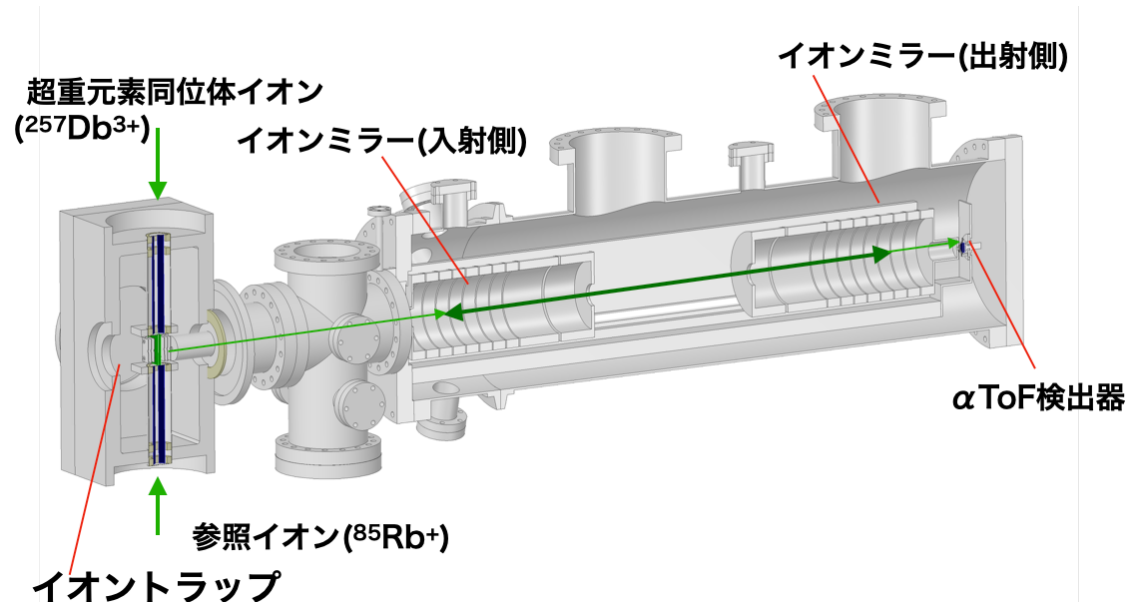


図 3 MRTOF 質量分光器 概念図

MRTOF 質量分光器は、多数の円環電極からなり、それぞれに精密に制御された高電圧を印加して電氣的な「ミラー」を構成し、イオンが何回も往復できるようになっています。イオントラップに蓄積されたイオンは、「スタート」のタイミングでミラーの方へ打ち出されます。それに合わせて、入射側のミラーの電位を一瞬だけ下げて、すぐに元に戻すことによって、イオンは一对のミラーの間を往復するようになります。ある適切なタイミングで出射側のミラーの電位を一瞬下げると、イオンは順次飛び出して  $\alpha$ -ToF 検出器に衝突します。この衝突したタイミングを「ストップ」時刻として、スタートとの差が飛行時間となります。

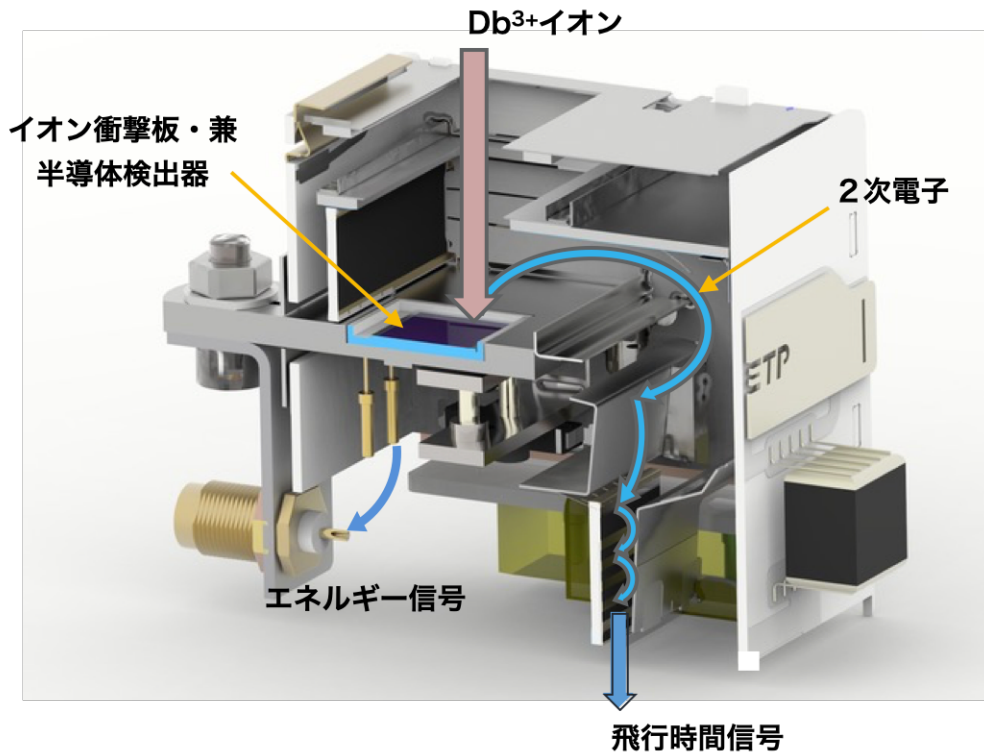


図 4  $\alpha$ -TOF 検出器

入射したイオンは衝撃板に衝突し、その時に発生する 2 次電子を増幅して飛行時間信号 (TOF)をつくります。衝撃板は半導体検出器からできているため、衝突したイオンが崩壊する時に発生するアルファ線のエネルギーとその時刻を同時に記録することができます。

こうして 6 日間かけた延べ 104 時間の測定で得られた飛行時間スペクトルが図 5 (左) です。ここでは飛行時間として、 $^{85}\text{Rb}$ イオンの飛行時間との比 ( $\rho$ ) を横軸にしています。赤・紫・灰の丸印が測定された飛行時間事象で、下の段には、射影した一つのスペクトルとして表示しています。この丸の色は図 5 (右) に示した、イオンが飛来してからアルファ線が観測されるまでの遅延時間 (崩壊時間) とアルファ線のエネルギーの相関で決めたものです。赤丸は、 $^{257}\text{Db}$  もしくはその娘核である  $^{253}\text{Lr}$ ,  $^{249}\text{Md}$ ,  $^{245}\text{Es}$  からのアルファ線として妥当なもの、紫丸は不純物として入ってくるポロニウム同位体( $^{211}\text{Po}$ )のアルファ線による擬似相関と判断されるもの、灰丸は、飛行時間信号しか得られなかった事象です。この分類による真の Db 事象と判断した 11 個の赤丸事象の  $^{85}\text{Rb}^+$ との質量比の荷重平均した値から、 $^{257}\text{Db}$  の質量を  $257.10742(25)$  u と、百万分の一の高い相対精度で決定することができました。また、結合エネルギーは、 $1892.1(2)$  MeV と導出できました。

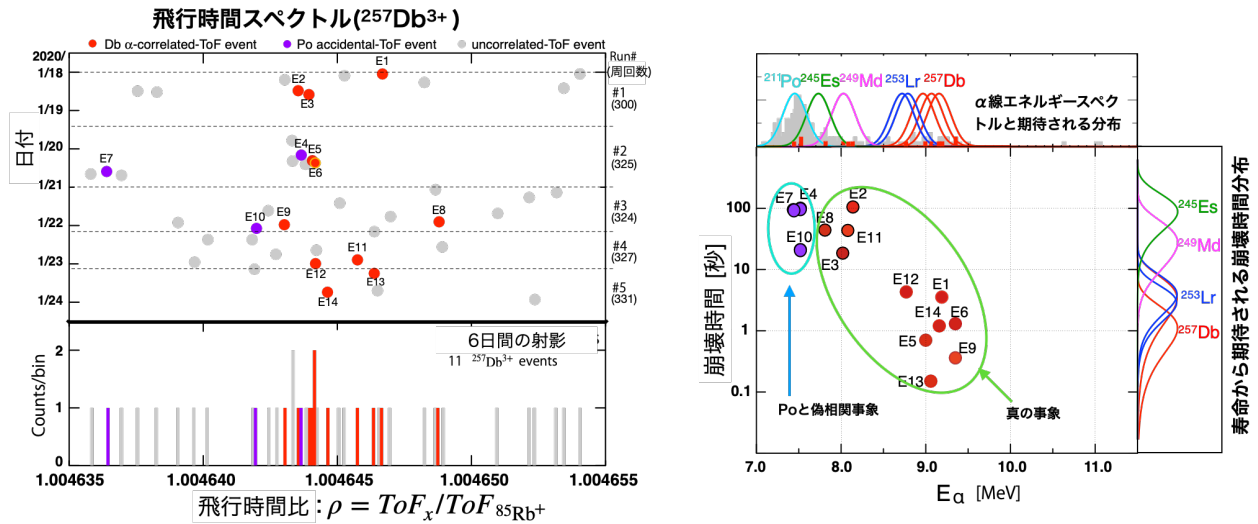


図 5 (左) 測定した飛行時間スペクトルで、横軸は  $^{257}\text{Db}^{3+}$  イオンの飛行時間を、参照イオン ( $^{85}\text{Rb}^{+}$ ) の飛行時間との比 ( $\rho$ ) として表示し、縦軸は実際の測定日時 (2020 年 1 月 18 日から 1 月 24 日) を示します。丸印が観測されたイオン 1 個に相当します。下部に示したのは飛行時間に射影したスペクトルです。日時によって測定条件 (周回数) を 300 回から 331 回まで 5 通りに変えて測定しています。

(右) 飛行時間と相関があったアルファ線のエネルギー (横軸) と、イオン飛来からアルファ線検出までの時間 (縦軸: 崩壊時間) の相関を示しています。E1 から E14 までの 14 事象のうち、赤印の 11 事象が  $^{257}\text{Db}$  およびその娘核 ( $^{253}\text{Lr}$ ,  $^{249}\text{Md}$ ,  $^{245}\text{Es}$ ) が崩壊した時の事象と判断できました。

今回の結果から、研究グループが開発した MRTOF 質量分光器と  $\alpha$ -TOF 検出器を用いれば、極稀にしか生成できない超重元素の同位体でも精密質量測定できることを示しました。また、この原子核の付近では元素の違いによる質量差が十分大きく、1~2 個の確実な事象が観測できれば、原子番号を同定するに十分な精度が得られることを示しました。

### 【本研究の意義、今後への期待】

超重元素という原子番号の大きな元素の原子核が存在できる仕組みを解明するための第一歩として、精密質量測定が実験的に可能な装置の開発に成功しました。今後は、できるだけ多くの超重元素同位体の質量を測定し、その系統性から、それが存在できる仕組みや、核図表の中でさらに遠くにあると予言されている「安定の島」の位置の予測精度をあげることが期待されます。

次に予定しているニホニウム・モスコビウム同位体の質量測定から、より重い超重元素の原子番号も確実に同定できると期待されます。さらに、従来は、寿命が短く連続的にアルファ崩壊する超重元素同位体しか検出できませんでしたが、何らかの方法で背景事象さえ分別できれば、精密質量測定が新しい検出・同定法になることも実証できました。

原子核の極限である超重元素の研究の新しい一里塚と言えます。

#### ※国際研究グループ

- ・ 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
- ・ 九州大学大学院 理学研究院 理学府物理学専攻
- ・ 日本原子力研究開発機構

- ・九州大学 超重元素研究センター
- ・ニューメキシコ州立大学

## 【論文情報】

雑誌名：PHYSICAL REVIEW C 104, L021304 (2021)

論文タイトル：First high-precision direct determination of the atomic mass of a superheavy nuclide

著者：P. Schury et al.

DOI番号：10.1103/PhysRevC.104.L021304

公開日：2021年8月31日（米国東部時間）

## 【用語解説】

### ※1. MRTOF質量分光器

多重反射型飛行時間測定式質量分光器の略称で、一定のエネルギーで一定の距離を飛ばした飛行時間からイオンの質量を分析する装置の一種。電氣的な鏡を向かい合わせて、その中を数100回、1/100秒かけて往復させることにより、1/100万の分解能で質量を測定することができます。同時に複数の種類のイオンを測定できます。

### ※2. 超重元素

元素には原子番号1の水素から92のウランまでの自然に存在しているものに加えて、人工的に118番までの元素が生成されています。そのうち原子番号104以降の重い元素を超重元素と呼んでいます。

### ※3. 安定の島

現在観測されている超重元素同位体よりはるか遠くの中性子がより多い領域に存在が予言されている原子核群です。周囲の原子核にくらべて安定で、寿命は100年とも数億年ともいわれているため、「安定の島」と呼ばれています。

### ※4. ニホニウム、モスコビウム

原子番号113番と115番の超重元素で、ニホニウムは日本の理化学研究所で発見された元素です。理化学研究所で生成されたニホニウムは質量数278の原子核( $^{278}\text{Nh}$ )ですが、ニホニウムにはロシアで最初に発見された、より中性子数の多い同位体( $^{282-286}\text{Nh}$ )があります。日本で発見された $^{278}\text{Nh}$ は連続的に6回アルファ崩壊して、よく分かっている $^{254}\text{Md}$ (メンデレビウム)まで到達したことが観測されています。一方、 $^{284}\text{Nh}$ は、4回アルファ崩壊して $^{268}\text{Db}$ (ドブニウム)に到達したと考えられていますが、ここで自発的に核分裂してしまうのでその確証はまだありません。そこで、 $^{284}\text{Nh}$ およびその親核である $^{288}\text{Mc}$ (モスコビウム)の精密質量測定をして原子番号を確認する実験が準備されています。