

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料
〔令和2（2020）年度 研究進捗評価用〕

平成29年度採択分
令和2年3月31日現在

革新的質量分光器を用いた重元素の起源の研究

Study of the origin of heavy elements using innovative
Mass Spectrographs

課題番号：17H06090

和田 道治 (WADA, MICHIHARU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授



研究の概要（4行以内）

白金やウランなどの重元素は宇宙における爆発的過程によって生成されたと考えられている。本研究では、その過程に関与する、自然には存在しない短寿命原子核の質量を網羅的に高精度で測定することによって、素過程の「実験」的検証を行う。重力波などの「観測」と理論的「計算」と併せて、重元素の起源の解明の一翼を担う。

研究分野：原子核物理学

キーワード：質量測定、r過程、超重元素、MRTOF、イオントラップ

1. 研究開始当初の背景

原子の質量はその構成要素である陽子・中性子・電子の総和に比べて極僅か軽い。この「質量欠損」は原子の全結合エネルギーに相当し、原子核研究において最も重要な原子の特性である。系統的な質量値の比較は、原子核の崩壊様式、変形、殻効果等の核構造研究に加えて、重元素の起源の解明に繋がる。

白金やウランなどの重元素の起源は爆発的天体現象である r 過程によって生成されたと考えられているが、この過程に関与する原子核は安定線から遠く離れた中性子過剰核であり、質量・半減期等の実験データは極めて乏しく、その拡充が求められている。

r 過程の終端でもある超重元素領域では、最近 Nh から Og まで新元素が命名されたが、熱い融合反応による新元素はより確実な原子番号と質量数の同定が求められており、精密質量測定は確実な質量数と原子番号同定法として期待されている。さらに、現在の超重元素の先にあると予測される「安定の島」へ到達する里標を築くものである。

2. 研究の目的

本研究では、新しく開発した高能率・高精度・高確度の質量分光器を、現在世界一多種類の原子核を生成できる施設に複数台展開して、超重元素から中重核に至る広い範囲の多数の原子核の質量を系統的に精密測定して元素の起源の研究を圧倒的に進歩させる計画である。

3. 研究の方法

理化学研究所の加速器施設 RIBF には、超重元素生成に適した GARIS、中性子過剰核生成に特化した KISS、満遍なく広範囲の短寿命核を生成する BigRIPS+SLOWRI という3箇所の短寿命核を提供する施設がある。この施設で得られる様々なエネルギーの短寿命核ビームを、高周波イオンガイドガスセルを用いてイオントラップに捕集し、MRTOF 質量分光器によって質量測定する。

MRTOF 質量分光器(図1)は、トラップから射出したイオンを、1対の静電ミラーからなる飛行管中を数百回往復させた後に引き出して検出し、その総飛行時間から質量を測定する装置であり、数ミリ秒の飛行で質量分解能 200,000 を達成できる。さらに、異なる原子核でも同時に測定できるため、短寿命原子核の網羅的質量測定に最適な装置である。

質量測定結果は、半減期、遅発中性子分岐比などのデータと併せて、理論的ネットワーク計算により、重元素の生成過程を再現する。

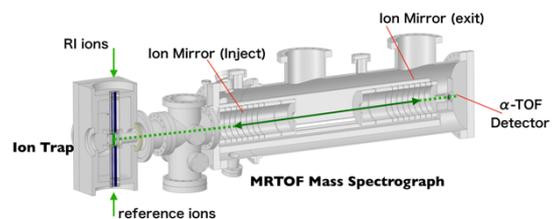


図1 MRTOF 質量分光器の構造

4. これまでの成果

これまでに、まず GARIS および KISS の MRTOF 質量分光器を整備し、それを用いた短寿命原

子核の質量測定に成功している。図 2 は、核図表上に、これまでに測定した 220 余の原子核示したものである。なかでも、ドブニウム ($Z=105$) の同位体 ^{257}Db の実験は、所謂超重元素 ($Z>103$) の同位体において、世界で初めて直接質量測定したことに相当する [1]。

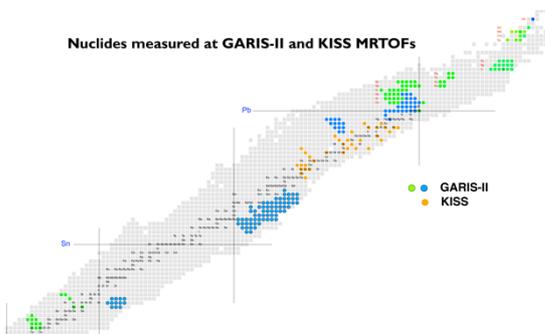


図 2 本装置でこれまでに測定した原子核
この実験において、Db の検出数は一日 2 個程度と低く、背景事象との弁別が極めて重要であるが、新規に開発した α ToF 検出器が有効に働き、確度の高い測定が可能になった。この検出器は、通常イオンの飛来時刻に加えて、飛来後そこで原子核が連続して α 崩壊する時のエネルギーと遅延時間を測定することができる [2]。これによって Db イオンが確かに飛来したことを担保できる。図 3 は、関連のある事象を α 線のエネルギーと遅延時間の 2 次元地図上に表示したものであり、6 事象は Db の崩壊、1 事象は娘核 ^{253}Lr の崩壊、4 事象は孫核の ^{249}Md の崩壊と関連していることがわかる。一方、2 事象は核子移行反応による不純物である Po 同位体の α 線との偶発同期事象と現時点では判定している。

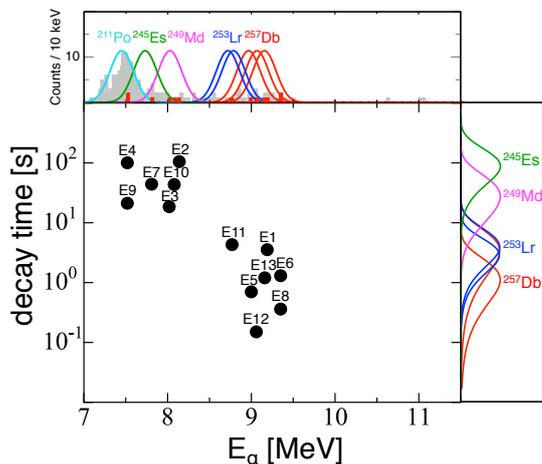


図 3 α ToF 検出器による Db イオンの飛来と関連した事象のアルファ線エネルギーと飛来から崩壊までの遅延時間相関図

この真の事象 (赤印で示した) を含む飛行時間スペクトルを図 4 に示す。ここで飛行時間は、参照イオンである $^{85}\text{Rb}^+$ イオンの飛行時間との比 (ρ) の関数として表示しており、周回数 (すなわち飛行距離) が異なる不純物イオンや、Db イオンだが α 線が検出器にかからな

い (α 線検出効率は 46% 程度) 事象も含まれる。このスペクトルから ^{257}Db 原子の質量は、予備的な解析結果として $257.10634(27)\text{u}$ を得た。これは、この方法がモスコビウム領域の原子番号を質量から同定するに十分であることを示している。

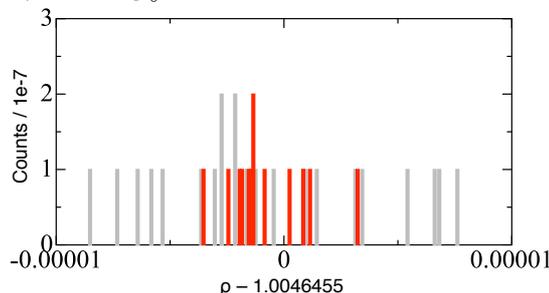


図 4 $^{257}\text{Db}^{3+}$ の飛行時間スペクトル

技術的には、KISS-MRTOF のビーム冷却機構として新規に開発した GCCB 方式が、1 価のイオンを 2 価に変換できること、分子イオンを壊して原子イオンにできるという他所に無い優れた性能を示し、測定精度の向上および不純物の混入という業界共通の問題を解決する一助になることを示した。BigRIPS+SLOWRI 施設用に開発している新型の ZD-MRTOF では、実に質量分解能 570,000 を 9 ms の飛行時間で達成しており、これは現在世界最高の性能である。

5. 今後の計画

まず、Ca48 同位体試料が入手でき次第、モスコビウムおよびニホニウム同位体の質量測定を開始する予定である。これにより $Z=115$ 以上の超重元素の原子番号の決定法を確固としたものにすることが期待される。

また、現在調整中の ZD-MRTOF を他の実験の裏で同時に質量測定を実行し、希土類元素、金・白金の起源となる短寿命中性子過剰原子核の網羅的質量測定を実行し、他の MRTOF 装置での測定と合わせて 1000 核種の質量測定を目指す。これらの質量値と、KISS および BigRIPS での崩壊測定による半減期、遅発粒子崩壊分岐比、核異性体分岐比等を合わせて、重元素合成のネットワーク計算を飛躍的に進歩させる計画である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] P. Schury, T. Niwase et al., submitted to Phys. Rev. Lett.
- [2] T. Niwase et al., Nucl. Inst. Meth A953, 163198 (2020).
- [3] M. Rosenbusch et al., Phys. Rev. C97, 064306 (2018).
- [4] S. Kimura et al., Int. J. Mass Specrom. 430, 134 (2018).
- [5] Y. Ito et al., Phys. Rev. Lett. 120, 152501 (2018).

7. ホームページ等

<http://research.kek.jp/wnsc/>