

First direct mass measurement of superheavy nuclide via MRTOF mass spectrograph equipped with an α -TOF detector

庭瀬, 暁隆

<https://hdl.handle.net/2324/4474932>

出版情報 : 九州大学, 2020, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 庭瀬 暁隆

論 文 名 : First direct mass measurement of superheavy nuclide via MRTOF mass spectrograph equipped with an α -TOF detector
(MRTOF と α -TOF 検出器を用いた超重核の直接質量測定)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

原子核は中性子や陽子といった核子の集合体が、結合エネルギー分だけ軽くなった状態で安定した系と考えることができる。結合エネルギーは核の存在や安定性を決定する指標となり、核子間相互作用を議論するための最も基本的かつ重要な物理量である。原子質量は核種固有の値であるため、精密な測定からその原子番号と質量数を一意に決定することができ、未知の超重元素の直接同定のための新しい道具として期待がされている。

これまでに世界各国で重い原子核の精密質量測定実験が行われてきたが、直接測定された最も重い元素は原子番号 103 番の Lr であり、原子番号 104 番を超えたいわゆる超重核の直接質量測定には未だかつて成功していない。我々はこれまでに、多重反射型飛行時間測定式質量分光器(MRTOF-MS)と気体充填型反跳分離装置(GARIS-II)を用いた SHE-Mass facility において、101 番元素 Md をはじめとする超アクチノイド元素の質量測定を行ってきた。

超重核の質量測定実験において隘路となっているのは、その小さな生成反応断面積に起因して生成量が極めて少ないという点にある。融合反応によって得られる希少数の原子から核種同定を行わなければならないため、測定対象物を分子イオンや散乱粒子等による背景事象から弁別できる、確度の高い質量測定法の開拓が急務であった。

本研究では、世界初となる超重核の直接質量測定を目指して、新検出器 α -TOF の開発を行った。 α -TOF 検出器は、従来の飛行時間検出器に Si 検出器を組み込むことにより、重イオンの飛行時間信号の取得とそれに続いた α 崩壊事象の相関取得を可能とした。これによって、1 日に数イベント以下の極めて稀な事象においても、崩壊事象を核の足跡とすることで確度の高い精密質量測定が実現できる。開発した α -TOF 検出器はまず、 α 線源と ^{224}Ra の系列核種放射線源を用いて性能評価を行った。オフライン試験によって α -TOF は 5.48MeV の α 線に対して 141.1(9) keV のエネルギー分解能と 250.6(68) ps の時間分解能を同時に実現し、超重核の質量測定実験を行うのに必要な性能を満たしている事を確認した。また、イオンの到達時刻と崩壊までの時間差から半減期を導出可能であることも実証した。引き続き行われたオンライン試験では、 $^{159}\text{Tb}+^{51}\text{V}$ 反応によって生成される ^{207}Ra を高背景事象環境中で測定し、 α 崩壊との相関測定による背景事象の抑制能力の実証を行った。

α -TOF 検出器は、重核の飛行時間と崩壊特性の相関測定ができるという強みを活かし、MRTOF による核分光研究への適用も期待される。そこで本研究の第二段階では、 α -TOF 検出器と MRTOF による核分光利用への実証実験として、 $^{159}\text{Tb}+^{51}\text{V}$ 反応によって生成される $^{206,207}\text{gRa}$ の質量と α 崩壊事象の相関測定を行った。この実験により $^{206,207}\text{gRa}$ の質量超過をそれぞれ $\text{ME} = 3540(54)$ keV, $3538(15)$ keV と、 ^{207}mRa の励起エネルギーを $E_{\text{ex}} = 552(42)$ keV と直接決定した。これらの実験値は、 α 線分光

実験により間接的に決定された質量および励起エネルギーを支持する結果であった。更に $^{207\text{m}}\text{Ra}$ について測定した飛行時間信号の総数と崩壊特性から α 崩壊分岐比を決定し、励起エネルギーおよび近傍核と比較した α 崩壊幅の系統性から、励起状態のスピンを $J^\pi=13/2^+$ と決定した。

本研究の最終段階として、 α -TOF を搭載した MRTOF によって超重元素同位体、 ^{257}Db の質量測定実験を遂行した。総計 105 時間のビーム照射で 11 個の $^{257}\text{Db}^{3+}$ の飛行時間信号とそれに相関した α 崩壊事象を取得した。 α 崩壊によって標識付けられた確度の高い 11 個の飛行時間信号から、 ^{257}Db の質量を 9.7×10^{-7} の相対精度で決定し、質量超過 $\text{ME} = 100\,063(231)$ keV を得た。この値は我々のグループによって過去に間接的に決定された質量値と $171(231)$ keV の差であり、一致している。実験で得られた ^{257}Db の質量および、既知の Q_α 値を用いて間接決定した 107 番元素 ^{261}Bh の質量を、幾つかの異なった手法による質量モデルの計算値と比較した結果、FRDM や WS4^{RBF} といった巨視的-微視的モデルによる計算値を支持する結果が得られた。さらに、本実験で得た 11 事象において、一つずつの事象から導出される質量は、原子番号の違う同重体の質量とは明確に区別できた。この結果により、この領域の超重核において、精密質量測定による原子核の原子番号と質量数の同定には、確度の高い 1 事象で可能ということが実験的に明らかになった。

α -TOF 検出器の開発によって、精密質量と α 崩壊特性の相関計測という新たな測定手法を開拓し、世界初となる超重元素同位体の直接質量測定に成功した。