

**革新的低速RIビーム生成法による超重元素の直接質量測定**

Direct mass measurements of super heavy elements using novel low-energy RI-beam production method

課題番号：24224008

和田 道治 (WADA MICHIHARU)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・チームリーダー



研究の概要

多重反射型飛行時間測定式質量測定器(MRTOF-MS)と高周波イオンガイド法を組み合わせ、これまで直接質量測定が困難であった重・超重元素の質量を精密測定する。これにより原子核の極限領域での存在原理の解明と、将来の安定の島（現在の超重元素より遠くにあると予言されている原子核群）への一里塚を築く。

研究分野：数物系科学・物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：直接精密質量測定・超重元素・高周波イオンガイド・イオントラップ

1. 研究開始当初の背景

ウランより原子番号が大きい原子核は、なぜその強いクーロン反発力下でも安定な状態で存在できるか明確には解明されていない。原子核の存在・安定性を決定しているのは原子質量であるが、超ウラン元素領域の原子核は少数の核種しか直接質量測定されていない。生成量が少ない重い短寿命原子核を高効率で能率よく、精密に直接質量測定する実験技法の開発が期待されていた。また、現在の超重元素よりさらに遠方にあると予言されている長寿命の原子核(安定の島)の一般的同定法も未開拓であった。

2. 研究の目的

新しい質量測定法と高速RIビームの減速捕集法によって、あらゆる元素の短寿命原子核の質量を、高効率かつ高精度な測定が数ミリ秒で可能になるようにし、これまで未開の地であった重い元素の同位体の質量を高精度で決定する。これによって、原子核の存在の重い極限における質量公式の精度を高め、既知の魔法数の破れの実証と新しい魔法数の発見をめざし、将来の安定の島探索の道筋をつける。

3. 研究の方法

多重反射型飛行時間測定式質量測定器(MRTOF-MS)は、1対の静電ミラーからなり、入射させたイオンを多数回往復させた後に全飛行時間を測定することでイオンの質量を決定する装置であり、本研究の研究協力者であるWollnikによって1990年代初頭に考案された。この原理を用いて、実際に加速器施設で生成される極少量しか得られない短

寿命原子核の測定に使用可能な測定器として開発する。

加速器で生成される新しい原子核は一般に高エネルギーイオンビームとして得られる。これを減速・冷却してイオントラップに捕集する技術は、本研究代表者らによって1990年代末に開発された高周波イオンガイド法が広く使われるようになった。高エネルギーイオンはヘリウムを充填したセル中で熱化され、その熱化イオンはセル内に配置された高周波カーペットによって生成される直流電場と不均一交流電場によってセル内壁に失われることなく真空中に引き出される。この技法を発展させ、より高効率・高精度・高速に低エネルギーイオンに変換する機構を実現させる。

これらの二つの装置を組み合わせることにより、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)で生成分離される超ウラン元素同位体イオンの質量の直接精密測定を実現させる。

4. これまでの成果

・MRTOF質量測定器のオンライン試験に成功。まず以前にBe同位体のレーザー分光に使用していた理化学研究所の入射核破砕片分離器(RIPS)のガスセル装置にMRTOF-MSを整備し、軽い短寿命原子核 $^8\text{Li}$ を用いて初のオンライン試験に成功した。わずか8msの飛行時間で、 $6.6 \times 10^{-7}$ の高精度の質量測定ができることを実証した。さらにその後のMRTOFイオン光学の改良により、 $^{40}\text{Ca}$ - $^{40}\text{K}$ 質量比較において、2.3msの飛行時間で $6 \times 10^{-8}$ の相対精度と2.4 keVの精度が得られた。(MRTOFは、理研

の他欧州原子核機構 (CERN)、ドイツの重イオン研究所 (GSI) で独立に開発が進められていたが、三者がほぼ同時期に最初のオンライン試験に成功している。)

・単一参照イオン質量校正法

一般に飛行時間測定式の質量分析では、複数の種類の参照イオンが必要だが、MRTOF-MS では、飛行開始時間決定の系統誤差が全飛行時間に比べて圧倒的に小さいため、単一参照イオンで正確な質量校正が可能なことを実証した。

・重い原子核の校正用の分子イオン源開発

超ウラン元素の質量校正用の、電子スプレー式分子イオン源と、その微弱クラスターイオンの高効率捕集用の小型高周波カーペットを開発した。質量数 200-300 において満遍なく参照イオンが得られることを実証した。

・ワイドバンド質量測定法の開発

MRTOF 質量測定器では、周回数は質量数によって異なっても、同時に複数の核種の質量スペクトルを収集できる。その周回数を正確に判定し、同時に多数の核種の質量測定が可能になる解析アルゴリズムを開発した。

・新型高周波カーペットの開発

ヘリウムガス中で熱化したイオンの捕集用に用いる高周波カーペットとして、従来のイオンバリア用高周波に加えて可聴波周波数の進行波を用いるイオンサーフィン方式を導入し、実際にカーペット表面に達するイオンをほぼ全て 0.5mm φ のノズルから引き出せることを実証した。

・冷却およびパンチ化用イオントラップ開発

ガスセルによって低エネルギー連続ビームに変換されたイオンを蓄積・冷却しイオンパンチとして引き出すために、傾斜型線型高周波四重極トラップと、平板型イオントラップ装置を開発した。

・GARIS-II からの短寿命核の引き出し成功

GARIS-II から得られた短寿命同位体 ( $^{205}\text{Fr}$ ,  $^{213}\text{Ac}$ ,  $^{215}\text{Ac}$ ,  $^{216}\text{Th}$ ,  $^{217}\text{Pa}$ ) ビームを、新規に開発した冷凍型ガスセル装置に導入し、低エネルギービームに高効率で変換されることを  $\alpha$  線スペクトル観測によって実証し、全効率約 30% ( $^{205}\text{Fr}$  において) を達成した。

5. 今後の計画

既にオンライン試験に成功している GARIS-II の冷凍型ガスセル装置と、その地下階に設置した MRTOF 質量測定器の間を繋ぐビームガイダンス装置と再パンチ化イオントラップを整備し、実際の重い短寿命核の質量測定実験を実行する。

最初は、 $^{40}\text{Ar}$  ビームと Dy, Tm, Lu, Ta, Ho, Yb, Hf 標的を用いて、Po, At, Fr, Ra, Ac, Th, Pa の多くの質量未測定同位体を生成し、初の直接精密質量測定を実行する。続いて、 $^{48}\text{Ca}$  ビームと Pb, Au, Bi, Tl 標的を用いて、Fm, No, Es, Lr, Md の同位体の質量測定を行う。これらの結果を踏まえて、Cm 標的を用いた

$^{257-260}\text{Lr}$  の同位体とさらに超重元素へと進めていく予定である。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1) “Single-reference high-precision mass measurement with a multireflection time-of-flight mass spectrograph”, Y. Ito, P. Schury, M. Wada, S. Naimi, T. Sonoda, H. Mita, F. Arai, A. Takamine, K. Okada, A. Ozawa, H. Wollnik, Phys. Rev. C, 88 (2013) 011306(R) 1-5.

2) “An rf-carpet electrospray ion source to provide isobaric mass calibrants for trans-uranium elements”, S. Naimi, S. Nakamura, Y. Ito, H. Mita, K. Okada, A. Ozawa, P. Schury, T. Sonoda, A. Takamine, M. Wada, H. Wollnik, Int. J. Mass Spectrom. 337 (2013) 24-28.

3) “A multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for short-lived and super-heavy nuclei”, P. Schury, M. Wada, Y. Ito, S. Naimi, T. Sonoda, H. Mita, A. Takamine, K. Okada, H. Wollnik, S. Chon, H. Haba, D. Kaji, H. Koura, H. Miyatake, K. Morimoto, K. Morita, A. Ozawa, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B, 317 (2013) 537-543.

4) “A novel ion cooling trap for multi-reflection time-of-flight mass spectrograph”, Y. Ito, P. Schury, M. Wada, S. Naimi, C. Smorra, T. Sonoda, H. Mita, A. Takamine, K. Okada, A. Ozawa, H. Wollnik, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B 317 (2013) 544-549.

5) “Genealogy of gas cells for low-energy RI-beam production”, M. Wada, Nucl. Inst. Meth in Phys. Res. B, 317 (2014) 450-456.

6) “A high-resolution multi-reflection time-of-flight mass spectrograph for precision mass measurements at RIKEN/SLOWRI”, P. Schury, M. Wada, Y. Ito, F. Arai, S. Naimi, T. Sonoda, H. Wollnik, V.A. Shchepunov, C. Smorra, C. Yuan, Nucl. Inst. Meth. In Phys. Res. B, 335 (2014) 39-53

7) “Investigation of the ion surfing transport method with a circular rf carpet”, F. Arai, Y. Ito, M. Wada, P. Schury, T. Sonoda, H. Mita, Int. J. Mass Spectrom., 362 (2014) 56-58.

8) “Wide-band mass measurements with a multi-reflection time-of-flight mass spectrograph”, P. Schury, Y. Ito, M. Wada, H. Wollnik, Int. J. Mass Spectrom. , 359 (2014) 19-25.

ホームページ等

<http://slowri.riken.jp>