

超重核研究のための多重反射型飛行時間測定式質量分光器



Peter Schury

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
peter.schury@kek.jp



伊藤 由太

日本原子力研究開発機構
先端基礎研究センター
ito.yuta@jaea.go.jp



和田 道治

高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
michiharu.wada@kek.jp

あらゆる複合粒子の束縛系における全系の質量は、質量とエネルギーの等価性 $E=mc^2$ から、個々の構成粒子の質量の総和より結合エネルギー分小さくなっている。陽子と中性子（総称して核子と呼ぶ）が核力によって結合する原子核では、この結合エネルギーは原子核の質量（核質量）の約 0.8% 程度（軽い核を除く）、変化の割合では 10^{-6} – 10^{-8} 程度に相当する。そのため、高精度な核質量値は、核内のすべての相互作用の総和として現れる結合エネルギーを直接反映し、それ故に原子核の安定性や構造変化を敏感に反映する静的プローブとなり得る。実際、初期の原子核物理において（測定精度は低いものの結合エネルギー変化の割合が大きいことが幸いして）原子核が特定の中性子数で特に安定となる魔法数や、その後の研究での不安定核における魔法数消失は、系統的な質量測定による結合エネルギーの変化から発見された。

イオンの質量電荷比の違いを利用して測定試料を分析する「質量分析」は、物理学のみならず様々な分野で広く用いられている。一方、原子核の「質量測定」では、イオン種の同定に留まらず、核質量自体が物理的な意味を持つことから質量値の精度（precision：どれだけ小さな桁で決定できるかの尺度）と確度（accuracy：真の値にどれだけ近いかの尺度）を両立させる精密な測定が重要となってくる。筆者らが開発した**多重反射型飛行時間測定式質量分光器 MRTOF**では、質量分解能 10 万超を実現することで精度を高めつつ、確度も損なわずに数々の工夫を凝らした。代表的なものとして、高分解能測定に特化したイオン

トラップの開発と飛行時間の時間的な揺らぎを校正し精度と確度を保証する**コンコミタントレファレンス法**の実装や、測定対象核種イオンの飛行時間測定と α 崩壊の相関を利用し背景事象を排除することでさらに確度を高める **α -TOF 検出器**の導入である。これらと飛行時間測定式質量分析法が本来持つ特性である迅速・高感度・高能率な測定を合わせることで、収量の少ない短寿命不安定核に対して、一度の測定で同時に複数のイオン種を精密質量測定できる革新性をもたらした。この複数種同時測定特性が、MRTOF を質量「分光器」として名付けた所以である。

この MRTOF を用いて、我々は原子核の中でも重い質量の極限である**超重核**領域の網羅的な質量測定を展開している。原子番号（陽子数）が大きいことによる強大なクーロン斥力下で超重核が安定化するためには、原子核の閉殻構造や変形に起因する結合エネルギーの獲得が必須である。また、超重核の球形二重魔法数近傍では原子核の「安定の島」と呼ばれる領域が予言され、予測半減期 100 年超にも及ぶ準安定な原子核の存在が半世紀以上も前から予測されている。このような未発見の超重核の安定性を理論的に正確に評価し、将来的な合成を実現するためには、安定の島へ至るまでの超重核の詳細な知識に頼るところが大きい。核質量は、核種の構成核子が異なる以上 1 つとして同じものは存在しない原子核の「指紋」でもあり、（長寿命かどうかにかかわらず）未発見の超重核種を崩壊測定に依らず質量値から一意に同定することも不可能ではない。

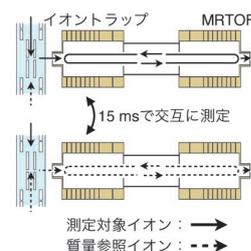
用語解説

多重反射型飛行時間測定式質量分光器 MRTOF：

イオンを一定エネルギーで一定距離飛行させたとき飛行時間がイオンの質量電荷比の平方根に比例することを利用する飛行時間測定式質量分析法において、電場中で多数往復させ飛行距離を延長することで高分解能を実現した測定器。複数イオン種を同時測定できる特徴を光の分光になぞらえて「分光器」と呼んでいる。

コンコミタントレファレンス法：

測定対象イオンの測定の前後に質量既知イオンの測定を挿入し、飛行時間の揺らぎを補正する手法。長時間測定における高精度・高確度を保証する。一方の測定中、もう一方はイオントラップ中で保持されるため、交互測定による効率損失は無い。



α -TOF 検出器：

MRTOF からのイオンの検出と、その核種の崩壊に伴い放出される遅発 α 粒子の測定を両立する検出器。背景事象を含むイオン検出信号の内、 α 崩壊する対象核種イオンのみを選別する。

超重核：

ラザホージウム（原子番号 104 番の元素）以上の重い元素の原子核。加速器を用いたのみ合成が可能。