



MRTOF 質量分光器

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・和光原子核科学センター

MRTOF (Multi Reflection Time of Flight) 質量分光器は、数ミリ秒の測定時間で、高精度・高精度の質量測定が高能率で可能な装置であり、短寿命原子核の質量測定に適しているため、最近特に注目を浴びて世界中の原子核研究施設に広まりつつあります。

1. MRTOF 質量分光器とは

一般に飛行時間測定式の質量測定装置は、等しいエネルギーに加速されたイオンが等しい距離を飛行した時、その飛行時間が質量（正確には質量荷電比）の平方根に比例するという原理に基づいています。具体的には、質量既知の参照イオンと、質量未知のイオンとの飛行時間の比の自乗を参照イオン質量に掛け算することで未知質量を決定します。では、如何にして高精度・高精度・高能率の質量測定が可能になるのでしょうか？

まず、鋭いタイミングで「等しいエネルギー」のイオンビームを作るために、イオントラップ中で1-2ミリ秒かけてガス冷却してから、10ナノ秒程度のパルスイオンとして引き出して、2kV程度の精密な静電圧によって加速します。これを4ミリ秒飛行させれば、時間分解能として400,000が得られ、これは質量分解能200,000に相当し、100イベント測定すれば相対質量精度(Precision)として $1/200,000/\sqrt{100} = 0.5 \text{ ppm}$ が得られる勘定になります。しかし、4ミリ秒飛行させるには300mもの距離が必要で単純な飛行管は現実的ではありません。MRTOFは、1m程度の飛行管を何回も往復させることで飛行距離を稼ぎます。この飛行管は、多数の円環電極からなり、適切な精密電位を与えることで一対のミラー電極を形成しています(図1)。イオンを飛行管へ入射する時と、検出器へ出射する時にそれぞれの側のミラー電極の電位を瞬時下げることで測定を実現しています。

ミラー電極を使って反射させることは、距離を稼ぐ以上に重要な意味があります。「等しいエネルギー」で飛ばしたつもりでも、必ず有限の

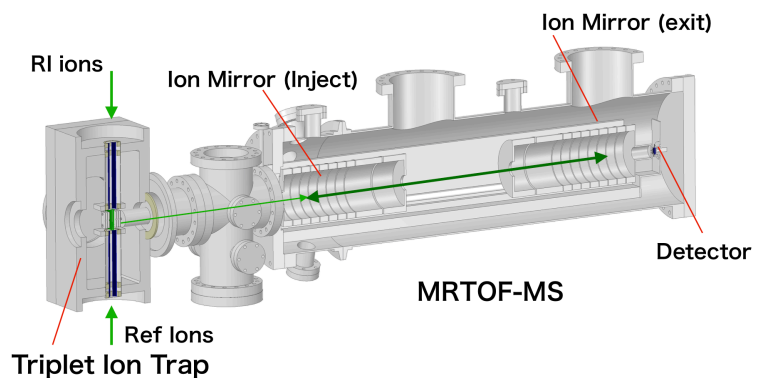


図1: MRTOF 質量分光器概念図

エネルギー広がり（数 eV 程度）が生じてしまいます。ミラーで反射させることで、少しエネルギーが高いイオンはより深い所で反射し、少し低いエネルギーのイオンは手前で反射しショートカットします。こうして（多少の）エネルギーの違いに依らず、飛行時間は質量のみに依存するというエネルギー等時性が得られ、これが質量分解能に大きく貢献しています。因みに、一回だけ反射させるリフレクトロンと呼ばれる TOF 質量分析器は、古くから分析化学の分野を中心に広く使われています。原理的には反復回数を増やして総飛行時間を長くすれば質量分解能は上がるはずですが、現実的にはイオン光学的収差や、ミラーの電位を決める電源の精度によって制限されるため 200,000 程度になっています。今後、それらの問題が改善できれば、500,000 以上の質量分解能も到達可能と考えられています。

質量測定において、精度とともに確度(Accuracy)が極めて重要です。MRTOF は低エネルギーの低価数のイオンを対象としているので、被測定イオンと非常に近い質量の参照イオンを使うことができ、本質的に高確度の測定が可能です。さらに、KEK-理研の MRTOF 装置では、入射用イオントラップに二方向からイオンを導入できる捕集用イオントラップを備えていて、15 ミリ秒の測定サイクルごとに被測定イオンと参照イオンを交互に測定しています。そのため常に高い確度が保証されるだけでなく、長時間測定における飛行時間のドリフトも補償することができます。こうして、実際に 0.03ppm の高精度測定でも依然として確度が保たれていることが確認できます [1]。

我々のグループでは MRTOF 「質量分光器」と呼んでいます。これはまるで光学分光器のように様々な質量を持ったイオンを同時に測定することができるからです。入射されたイオンは、偶々出射側ミラーを開ける時に軌道を乱されるもの以外、すべて検出器に到達して飛行時間を記録し、ヒストグラム上に各々ピークを形成していきます。共鳴を掃引するような過程は存在しません。質量数が変わると周回数も変わり得ますが、常に周回数を少し変えたペアで測定を行うので、各々のピーク毎の周回数の同定も可能になっています。実際、理研 GARIS-II における最初の質量測定において、10 種類の原子核を 1 つのスペクトル上で測定しています [2]。

2. KEK-理研 MRTOF 装置の展望

理研 GARIS-II に設置した初代 MRTOF 装置(SHE-Mass)において、超ウラン元素メンデレビウム、アインシュタインウム同位体を始めとして 7 個の初質量測定と 30 個の初直接質量測定を含めた 70 核種の測定に成功しています [3,4]。これには、半減期 10 ms の ^{219}Ra も含まれます。いま、複数台の MRTOF 装置を GARIS, KISS, BigRIPS-SLOWRI に整備して、超重元素を含む RIBF で得られる半減期が概ね 10 ms 以上のあらゆる短寿命原子核の質量を網羅的に高精度測定するプロジェクトが始まっています。

参考文献

- [1] S. Kimura et al.: Int. J. Mass Spectrom. **430** (2018) 134.
- [2] P. Schury et al.: Phys. Rev. C **95** (2017) 011305R.
- [3] Y. Ito et al.: Phys. Rev. Lett. **120** (2018) 102501.
- [4] M. Rosenbusch et al. : Phys. Rev. C **97**, (2018) 064306.