

氏名	木村 創大
学位の種類	博士 ( 理学 )
学位記番号	博 甲 第 8410 号
学位授与年月日	平成 29年 12月 31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Precision mass measurements of neutron-deficient nuclei in  $A \sim 60-80$  region via multireflection time-of-flight mass spectrograph

(多重反射型飛行時間式質量分析器を用いた  $A \sim 60-80$  領域中性子欠乏核の精密質量測定)

主査	筑波大学教授	博士(理学)	小沢 顕
副査	筑波大学教授	理学博士	三明 康郎
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	笹 公和
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	富田 成夫
副査	高エネルギー加速器研究機構教授	理学博士	宮武 宇也
副査	高エネルギー加速器研究機構教授	理学博士	和田 道治

## 論 文 の 要 旨

審査対象論文は、多重反射型飛行時間式質量分析器を用いて、質量数が 60 から 80 の領域の中性子欠乏核の精密質量測定に関するものである。陽子数と中性子数が等しい  $N=Z$  ライン近傍の陽子過剰核の質量は爆発的熱核燃焼過程の一つである早い陽子捕獲過程(rp 過程)において重要な役割を演じている。rp 過程はその反応経路に長寿命の  $N=Z$  核(滞留核)を持ち、滞留核の実効的な寿命に強く依存している。滞留核の実効的な寿命は滞留核の陽子および2陽子捕獲反応の  $Q$  値に指数関数的に依存している。 $Q$  値は反応に関連する原子核の質量によって決まり、rp 過程の理論計算から原子核質量に由来する不確かさを取り除くためには、 $N=Z$  ライン近傍の陽子過剰核の質量を  $\delta m/m < 10^{-7}$  の高精度で決定する必要があった。

この目的を達成するために、本研究では、多重反射型飛行時間式質量測定器(MRTOF-MS)とガス充填型反跳核分離装置 GARIS-II を組み合わせた SHE-mass facility を用いた陽子過剰な中重核の精密質量測定実験を提案した。MRTOF-MS はその10ミリ秒以下という短い測定時間から100ミリ秒以下の半減期しか持たない目的とする陽子過剰核の精密質量測定に有利な手法であった。

目的としている陽子過剰な中重核は反応に用いる標的核と入射核の質量数がほぼ対称な融合蒸発反応を用いて生成することが可能であるが、対称な融合蒸発反応では GARIS-II 内での一次ビームと反応生成物の磁気剛性値が近く、これらの分離が困難になる。このため高強度の一次ビームを使用すると

GARIS-II 焦点面に設置された MRTOF-MS へのイオン輸送系がダメージを受け実験遂行が不可能になることが予測されていた。本研究では、このような事態を回避するため一次ビームの分離を改善するためのビームストッパーの設計開発を行なった。製作したビームストッパーの性能評価は  $^{208}\text{Pb}(^{18}\text{O},3\text{n})^{223}\text{Th}$  反応を用いて行ない、最終的にビームストッパーを使用することにより GARIS-II 焦点面における S/N 比を約250倍向上させることに成功した。

本研究では、ビームストッパーを組み込んだ SHE-mass facility を用いて  $^{63}\text{Cu}$ 、 $^{64-66}\text{Zn}$ 、 $^{65-67}\text{Ga}$ 、 $^{65-67}\text{Ge}$ 、 $^{67}\text{As}$ 、 $^{78,81}\text{Br}$ 、 $^{79\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{80,81\text{m}}\text{Rb}$  および  $^{79,80}\text{Sr}$  の質量測定を行なった。これら核種の質量決定には同重核によるシングルリファレンス法を用いている。解析の結果 AME2016 Atomic Mass Evaluation の評価値と有意に差がある値が  $^{67}\text{Ge}$  および  $^{81}\text{Br}$  について得られた。これらの質量は AME2016 では間接測定の結果を元に評価しており、今回直接測定法である MRTOF-MS によって得られた値、 $\text{ME}(^{67}\text{Ge}) = -62675.2(46) \text{ keV}$  および  $\text{ME}(^{81}\text{Br}) = -77955.4(53) \text{ keV}$ 、を新たな質量超過値として提案した。この結果は安定核であっても従来間接的手法のみで質量が決定されてきた核種については、直接測定による再評価の必要性を明らかにした。本実験における質量の決定精度は  $\delta m/m \sim 10^{-7}$  から  $10^{-8}$  の間であった。最も高い精度で質量を決定したのは  $^{65}\text{Ga}$  で  $\delta m/m = 3.5 \times 10^{-8}$  であり、得られた質量値は AME2016 の評価値とよく一致していた。今回の結果は、MRTOF-MS による不安定核質量測定において最高精度の測定結果である。今回の測定より、MRTOF-MS が rp 過程が要求する精度での質量測定を行なえることを示している。SHE-mass facility は超重元素(SHE)の質量測定を目指し開発が進められているが、本研究は、SHE-mass facility が超重元素領域に留まらずより核図表上の広い範囲に対しても適用可能であることを明らかにした。

## 審 査 の 要 旨

[批評]

早い陽子捕獲過程 rp 過程は、X 線バーストの有力なソースであると考えられており、その過程は、安定線から離れた陽子ドリップ線付近を通過すると考えられている。しかしながら、rp 過程の反応経路を決めるには、これら陽子ドリップ線付近の不安定核の質量測定が不可欠である。rp 過程を不定性なく決めるには、 $\delta m/m < 10^{-7}$  の高精度で決定する必要がある。不安定核の質量測定法には、間接測定と直接測定があるが、直接測定が望ましい。直接測定法にはいくつかの方法があるが、本研究で対象とする不安定核は、半減期が短く(100 ミリ秒以下)、短時間で高精度の測定をする必要があった。このような測定に適した質量測定装置として、最近、多重反射型飛行時間式質量分析器(MRTOF-MS)が開発された。本研究は、MRTOF-MS を理研のガス充填型反跳イオン分離装置 GARIS-II と組み合わせて、不安定核を含む、陽子過剰核の質量測定を試みた研究である。陽子過剰側不安定核の生成するための核反応は、対称系であるため、一次ビーム由来の大量のバックグラウンドが混入する。本研究では、シミュレーションも使用して、バックグラウンド低減のためのビームストッパーを設計製作し、実際に、バックグラウンドを数100分の一にすることができた。これにより、 $^{63}\text{Cu}$ 、 $^{64-66}\text{Zn}$ 、 $^{65-67}\text{Ga}$ 、 $^{65-67}\text{Ge}$ 、 $^{67}\text{As}$ 、 $^{78,81}\text{Br}$ 、 $^{79\text{m}}\text{Kr}$ 、 $^{80,81\text{m}}\text{Rb}$  および  $^{79,80}\text{Sr}$  の質量測定を行なうことができた。これらの原子核の中で、質量の新データはないが、 $^{67}\text{Ge}$  および  $^{81}\text{Br}$  については、先行研究による評価値と有意に差がある値が得られた。先行研究は、間接測定であり、直接測定の重要性が示唆される。今回の研究で、最も高い精度で質量を決定したのは

$^{65}\text{Ga}$  で  $\delta m/m = 3.5 \times 10^{-8}$  であり、これは、MRTOF-MS による不安定核質量測定において最高精度の測定結果である。このような高い分解能の質量測定が行えたことは高く評価できる。本研究は、MRTOF-MS が rp 過程が要求する精度での質量測定を行なえることを示した。本研究により、今後、rp 過程の理解が大きく進展することが期待できる。

〔最終試験結果〕

平成29年11月27日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認める。