

氏名	GE ZHUANG		
博士の専攻分野の名称	博士（理学）		
学位記号番号	博理工甲第 1094 号		
学位授与年月日	平成 30 年 9 月 21 日		
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当		
学位論文題目	Time and Position-sensitive Foil MCP Detector for Mass Measurements at the Rare-RI Ring (稀少 RI リングを用いた質量測定のための時間及び位置感応薄膜 MCP 検出器)		
論文審査委員	委員長	連携教授	上坂 友洋
	委員	准教授	山口 貴之
	委員	教授	鈴木 健
	委員	教授	吉永 尚孝
	委員	准教授	寺田 幸功

論文の内容の要旨

An experiment aimed to study the principle of mass measurements and performance of the Rare RI Ring performing as an Isochronous mass spectroscopy has been carried out at RIBF, and the first fission fragments, created by ^{238}U projectiles in a beryllium target at the entrance of the BigRIPS focus F_0 , were spatially separated by and injected into the R3. In the experiment, we succeeded in selection, injection, accumulation and extraction of 5 different nuclei to R3 and the isochronism $\sim 5 \times 10^{-6}$ was achieved by checking the TOF spectrum of ^{78}Ge . The results of these pilot experiments on nuclides of well-known mass are in agreement with the mass values given in the literature of AME2016. A mass resolving power of about $\delta m/m = 62\,000$ (FWHM) has been achieved according to the isochronism of the reference nucleus ^{78}Ge . From the analysis, nuclei of a wide range momentum distribution of $\pm 0.3\%$ and difference of mass-over-charge ration $\sim 8\%$ are within one $B\rho$ setting to be deduced with the masses by the orbit-IMS method. A newest machine study with the isochronism of $\sim 4 \times 10^{-6}$ and efficiency of 1.9% achieved shows a resolving power of about $\delta m/m = 78\,000$ (FWHM). From the analysis, it is confirmed that from one experiment run, two complementary mass measurements methods (IMS and $B\rho$ -TOF) can be employed simultaneously to deduce masses and benefit each other, in which it is very suitable to save beam time and cover large area of nuclide of chart and large momentum area of secondary products from experiment of very exotic nuclei. It is also proved that to achieve high resolution, the revolution time measurement of the stored ions and the magnetic rigidity or the velocity for correction of the in-ring TOF should be simultaneously measured, thus we can achieve high resolution with small systematic error to cover relative large range of $\delta m/m$ relative to reference ion in isochronous condition for the IMS method. Besides, a new mass of ^{74}Ni (mass excess -72190 keV and mass uncertainty 927 keV) which is not included in the newest atomic mass evolution (AME2016) is deduced in this work by $B\rho$ -TOF method. The mass of ^{74}Ni is very important for the research of nuclear shell effect and also show importance of the impact on the r-process modeling.

Meanwhile, as in the above in-flight fission experiment, there is large energy loss in the PPAC at F6 dispersive focus, which is for position measurement to deduce the momentum have large influence to the mass accuracy. At the same time the timing resolution of MCP detector of about 200 ps can not satisfy the high resolution mass measurements from the TOF. For these reasons, and to increase the resolution and accuracy of the IMS mass measurements of exotic nuclei, a large area position sensitive mirror-type foil MCP (Micro-channel plate) timing detector, which possesses specifications of low energy loss and energy straggling by detection of secondary electrons (SEs) induced from conversion foil, at the same time is being developed at the Rare RI Ring (R3). This type of detector is a versatile instrument which can be used on the beam-line for two dimensional position measurement to reconstruct beam trajectory, beam-line momentum measurements for velocity reconstruction, meanwhile, it can be used for position monitoring and revolution time measurement turn by turn inside the storage ring, R3. For high resolution mass measurements, high resolution momentum measurement with low energy loss and energy straggling is indispensable for reconstruction of the velocity for in-ring mass deduction or momentum measurement with good accuracy and high precision for Bp-TOF mass measurements. High resolution TOF in ring is not only significant for identification of nuclei but also can be also used for mass measurements directly. To characterize and optimize the timing and position resolution of the detector, an isochronous condition is chosen and resolution dependence of high voltage supplies has been studied experimentally and by simulation. Experiments aimed at studying the performance of the detector was conducted at HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) with heavy ion beam and with alpha source of ^{241}Am . The performance of the detector have been optimized and the best achieved timing resolution and position is ≤ 50 ps and 1 mm in σ respectively, for which the detection efficiency is ~ 95 %. The performance of another same type of mirror detector coupled with timing anode which is dedicated for TOF measurement has been studied by heavy ions at HIMAC. The best achieved timing resolution is ~ 40 ps (in σ) and detection efficiency is ~ 96 % for heavy ion beams. This timing detector will be used for revolution time measurement inside R3, start TOF detector of the total TOF for in-ring circulation, beam-line TOF measurement for beam-line mass determination and velocity reconstruction for in-ring mass correction. The fast low-energy-loss position-sensitive timing detector developed within this work in use for in-ring and on beam-line are discussed and summarized, and is ready to be utilized to realize a higher performance mass measurements simultaneously employing the Rare-RI Ring in conjunction with the high resolution beam-lines BigRIPS-OEDO-SHARAQ by the two complementary TOF Methods: Magnetic-rigidity- time-of-flight (Bp-TOF) and Isochronous Storage Ring Mass Spectrometer (IMS). The up-coming experiments at the Rare-RI Ring will provide a large number of new accurate masses values, which will contribute to a better understanding of nuclear structure, nuclear astrophysical processes, and even fundamental interactions.

論文の審査結果の要旨

原子質量は、素粒子物理学から宇宙物理学に至る幅広い分野に渡る科学研究の基本となる量である。原子質量の大半を担っているのは、原子核の質量であり、現在世界の多くの施設で原子核の精密質量測定が行われている。その中で特に注目を集めているのは、速い中性子捕獲過程や速い陽子捕獲過程と関わる短寿命不安定原子核の質量測定である。ここで対象とする短寿命不安定核は、生成が極めて困難なため世界でも限られた加速器施設でのみ研究可能であるとともに、寿命が1秒を大きく下回ることから、従来この分野で用いられていたペニングトラップを用いた手法やビーム冷却を伴う蓄積リング質量測定を適用することができない。この2つの困難を乗り越えるのが理化学研究所 RI ビームファクトリー施設に建設された稀少 RI リングである。

RI ビームファクトリーは、現在世界で最も多種の不安定核をビームとして供給できる施設であり、速い中性子捕獲過程や速い陽子捕獲過程において鍵となる原子核に対する質量測定を可能とする。一方、稀少 RI リングは、等時性質量分光という手法に特化した質量測定用蓄積リングであり、ビーム冷却を用いず1ミリ秒以下の測定時間で質量を 1ppm の精度で決定できる優れたシステムである。この測定系の本質的な特徴の一つは、不安定核生成からリングまで約 200m のビーム輸送系で、ビームの同位体同定と速度・ビーム軌道測定を粒子毎に行うことができる点にある。ビーム輸送系でのビーム速度測定により、複数の同位体に対して「等時性」からのズレを高精度で補正することができ、これがシステム全体として高い性能を発揮することにつながっている。このシステムではビーム輸送系のみでも原子核質量を測定することができ、精度は稀少 RI リングでの測定に及ばず 100ppm 程度にとどまるものの、測定効率はリングの約 50 倍高くかつより多種の同位体を同時に測定できるという利点を持つ。これら稀少 RI リングとビーム輸送系を用いて設計通りに質量測定を行うには、詳細なイオン光学調整が必須であり、更にそのためにはビームの速度や軌道に大きな影響を与えることなく、ビームの到達時間や軌道を高精度で測定する検出器が必要となる。

本学位論文の研究は、ビームに対する影響を最小限に留めるタイミング・位置検出器の開発を行うとともに、それと平行してビーム輸送系のみを用いた場合の質量測定のパフォーマンス評価を行うことを目的としている。いずれも、稀少 RI リングを用いた質量測定に必須であり、その研究ポテンシャルを向上させる研究である。

ビーム輸送系を用いた質量測定のパフォーマンス評価は、ウラン 238 ビームの入射核破砕反応で生成される原子番号 $Z=28(\text{Ni})$ — $33(\text{As})$ 領域の中性子過剰核を用いて行われた。Ge 氏は、2つのアクロマティック（収色性）焦点面 (F3, S0) 間の飛行時間から粒子の速度を導出し、分散焦点面 (F6) の位置から磁気剛性を導出し、これらの量から質量を決定する手法を開発した。一般に光学系では粒子の軌道はその運動量によって異なるため、飛行時間から速度を導出するには磁気剛性の情報が必要となる。また、磁気剛性の導出には粒子の軌道情報が必要となる。Ge 氏は、実験中に得られたデータを基にビーム輸送系のイオン光学特性を高次収差の詳細に至るまで解析し、更に中間焦点面に設置された検出器でのエネルギー損失の影響を考慮した、粒子の速度と磁気剛性決定法を確立した。この手法と $z=29-33$ 核の既知の質量から、実験当時は未知であった ^{74}Ni 核の質量を評価し、超過質量 (mass excess) を $-72190 \pm 927\text{keV}$ と決定した。Ni 核は陽子魔法数 28 を持つ、原子核構造研究においては重要な役割を果たす原子核である。

Ge 氏の研究によって、ビーム輸送系を用いることにより、稀少 RI リングと相補的な高効率・高アクセプタンスの質量測定ができることが実証された。今後稀少 RI リングを用いた実験の際には、常に並行してビーム輸送系測定による質量データが副産物として得られ、より広がりを持つ研究の展開に資することとなる。

先に述べたように、稀少 RI リングを用いた研究推進には、ビームの速度や軌道に大きな影響を与えることなく、ビームの到達時間や軌道を高精度で測定する検出器が必要となる。この目的のためには、いかなるガス検出器も、主として真空隔壁となる膜が要因となって厚過ぎであり、用いることができない。唯一適用可能なのが、薄膜とマルチチャンネルプレートを組み合わせた検出器（以下薄膜 MCP 検出器と呼ぶ）である。この検出器では、イオンが薄膜を通過する際に放出される二次電子を、電場によって輸送した後マルチチャンネルプレートで増幅して信号として取り出す。これまで、稀少 RI リングや、先行研究であるドイツ GSI の ESR 施設、中国近代物理研究所の CSRe 施設でタイミング検出器として用いられた例はあるが、蓄積リング中での軌道測定に用いられた例はない。

Ge 氏は、過去のあらゆる薄膜 MCP 検出器の研究を検討し、今回の実験的要請に叶うのはミラー型電極構造を持つ検出器であるという結論に到達した。引き続き電場内の電子の運動について、様々な電極ジオメトリ、電位の組み合わせに対して詳細なシミュレーションを自身で実施し、最適なデザインを決定した。更に MCP としては、位置感度を持ち、かつ高い検出レートを実現できる遅延ライン・アノード構造を持つ MCP 検出器を採用した。位置感度を持つもう一つの可能性は抵抗分割・アノード構造を持つものだが、こちらは検出レートを高くできないというデメリットがある。

以上の検討に基づいて、 $110 \times 45 \text{ mm}^2$ の検出面積を持つ実機を製作した。薄膜は $2 \mu\text{m}$ 厚のアルミ蒸着マイラー膜であり、RI ビームファクトリーでよく用いられる平行平板アバランシェ検出器に比べて 20 倍程度小さな物質質量である。これを用いてマスクを用いた位置校正、アルファ線源を用いたオフラインテストを行い、シミュレーションから得た位置分解能の電圧依存性を確認するとともに、検出効率等の基本性能の測定を行った。位置分解能は、シミュレーション通り加速電圧を高くするに従い向上し、X 方向（グリッド電極と平行方向）では約 1mm、Y 方向（グリッド電極と垂直方向）では約 3mm となっていることを確認した。ここまでの成果は、Ge 氏を主著者とする論文“Development of Mirror-type MCP Detectors for Mass Measurements at the Rare RI Ring”として JPS Conference Proceedings での出版が決定している。

最終的な性能評価は、放射線医学総合研究所 HIMAC 加速器で得られる核子当たり 200 MeV の ^{84}Kr ビームを用いて行った。核子当たり 200MeV は稀少 RI リングで行う実験で用いるエネルギーとほぼ等しく、ここで得られる性能が実際の質量測定実験での性能と考えられる。Ge 氏は、共同研究グループを主導し性能評価実験を遂行し、約 1mm の位置分解能、40 ps の時間分解能、95% の検出効率が実現できていることを確認した。

ここで得られた結果は、ミラー電極と遅延ライン・アノード MCP 検出器により、1) 上述したビーム輸送系での質量測定の精度を 4 倍上げることができる、2) 稀少 RI リング内での粒子軌道測定を可能にし、リング内でのイオン光学調整を実現する、3) 特に重イオンビームに対しビーム輸送系での軌道測定をエネルギー損失が結果に影響を与えないレベルで実現する、ことができることを示している。

Ge 氏は、2015 年以來稀少 RI リングの建設と 3 度のイオンビームを用いた性能評価実験において大きな

貢献をし、更に上で述べたビーム輸送系を用いた質量測定の可能性の提案と実証、今後の質量測定実験で必須となる時間及び位置感度を持つ薄膜 MCP 検出器のシミュレーション・設計・性能評価を自身で行い、新しい検出器が必要仕様を実現していることを確認した。これらの研究開発は、今後稀少 RI リングを用いて行われる短寿命不安定核の質量測定において本質的に重要である。また Ge 氏はこの研究開発過程で、原子核物理学の実験研究者として必須な検出器開発能力、データ開発能力を身に付け、更に今後稀少 RI リングを用いて行うべき研究について考察を行い実験提案に結びつけようとしている。以上の点から、Ge 氏の論文は十分に博士の学位に見合うものと評価し、論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。