

氏名	阿部 康志
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博乙第 2784 号
学位授与年月日	平成 28 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	Study of isochronous field in Rare-RI Ring for high-precision mass measurements (精密質量測定のための稀少 RI リングの等時性磁場の研究)
主査	筑波大学教授 博士(理学) 小沢 顕
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 江角 晋一
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	理化学研究所室長 理学博士 若杉 昌徳

論 文 の 要 旨

Precise mass values of nuclei are very important for the understanding of basic property of nuclides. Especially, nuclear masses in the neutron-rich area are essential in determination of the r-process path. However, these nuclei with their very short half-lives (on the order of milliseconds) are extremely difficult to produce in the laboratory and even more difficult to study. Recently, some of these r-process nuclei were produced at the RIKEN RI Beam Factory (RIBF) with relatively low yield.

We constructed new storage ring based on the isochronous mass spectroscopy technique, named the “Rare-RI Ring”, in order to measure the mass of these rare nuclei with high-precision. The goal is to perform for mass measurement with a relative mass precision on the order of 10^{-6} even for a single event. Furthermore, it is to perform the mass measurement within a measurement time span of one ms. To measure the mass with relative precision of 10^{-6} order, isochronism of the ring must be achieved on the order of 10^{-6} . To provide precise isochronism over a wide range of momentums, the design of the ring was based on cyclotron design. In the case of our ring, it consists of six sectors and six straight lines and has a hexagonal shape. Each sector consists of four rectangular bending magnets. In addition, in order to make an isochronous field, the two outer bending magnets of each sector were equipped with ten one-turn trim coils. There are two ways of achieving a first-order isochronous field. One is the installation of an edge angle in the magnet of sector; the other is the installation of an n-value in the magnets of a sector instead of the edge angle. The first-order isochronous condition is satisfied by creating a magnetic field, which has the n-value. The radial gradient value (n-value) was calculated

using MAD and COSY INFINITY program with the actual geometry for one sector.

In order to perform the mass measurement of unstable nuclei, all devices must work exactly. Usually, the device check is performed using an accelerated beam. However, cost of experiments using accelerated beam are very large and time constraint is very severely. Therefore, performing a device check by using accelerated beam is very difficult. To overcome these problems (the cost and time), I suggested a new test method using an α -source (^{241}Am). The cost of α -source is very small and we can use the α -source any time. By using the α -source, we checked all devices and verified injection and extraction of a single particle. Further, the isochronism of the ring using α -source was measured by evaluating the width of time-of-flight spectrum while changing the n-value of magnetic field using trim coils.

In the experiments using an α -source, the individual injection method was performed, for the first time in the world. The isochronism 3.1×10^{-4} was obtained for one turn measurement. Also, an isochronism of 8.8×10^{-5} was achieved for three turns measurement. These results were in very good agreement with simulations. From these experiments, it was found that the ring is running as designed and that experiments using accelerated beam is also possible. Therefore, to verify whether a tuning method obtained from the off-line experiments is applicable to heavy-ion beam experiments, the on-line experiment was performed, which was used 345 MeV/u ^{78}Kr beam. In this experiment, to perform an individual injection using self-trigger signal from F3, the energy of ^{78}Kr beam was degraded to 168 MeV/u by using Al plate-type degrader. By performing adjustment same as the off-line experiments, the injection, storage and extraction of heavy-ion beam were succeeded. From these results, it was found that the tuning method can be directly applied to the heavy-ion beam experiments. Furthermore, as a result of adjusting the isochronous field by trim coils, isochronism of the ring was achieved to 7.3×10^{-6} in the range of momentum acceptance $\pm 0.3\%$.

In near future, the mass measurement using the Rare-RI Ring will be started and it will be approached greatly to the understanding of the r-process.

審 査 の 要 旨

〔批評〕

原子核の質量は、核構造のみならず宇宙元素合成の理解の上でも重要である。特に、重い中性子過剰不安定核の質量は、鉄以上の重い元素を合成する r プロセス過程の解明の上でも重要である。現在、不安定核の質量測定には、主に、低エネルギーの不安定核ビーム(RI ビーム)を利用するイオントラップによる測定と、高エネルギーRI ビームを利用する蓄積リングにおける測定がある。本研究は、高エネルギーRI ビームにおける新しい蓄積リング(稀少 RI リング)の開発とその性能評価に関するものである。稀少 RI リングは、理化学研究所 RI ビームファクトリー(RIBF)の大型基幹装置の一つとして、約 10 年前から開発/製作が進められている。従来の蓄積リングに比べて、稀少 RI の個別入射を行う点、およびサイクロトロン型等時性蓄積リングであるのが特徴である。稀少 RI リングは、2013 年度中にはほぼ完成したが、その性能評価をどのように進めるかは課題であった。阿部氏は、稀少 RI リングの性能評価法として、 α 線の蓄積を

提案し、そのための改造を行った。 α 線の利用により、オフラインでの性能評価が可能となった。 α 線による等時性度の評価と、個別入射の検証が可能となり、稀少 RI リングの主要性能が評価できたことは高く評価できる。さらに、 α 線のオフライン測定の経験と結果は、 ^{78}Kr ビームを使ったオンライン実験でも生かされた。 ^{78}Kr ビームに対する等時性度が効率よく設定可能となった。オンライン実験での成果の一つは、等時性が、予想値($\sim 10^{-6}$)に達していることが確認できたのみならず、高次の補正を施すことにより、等時性向上が可能であることがわかったことである。これらの研究により、稀少 RI リングの性能向上が見込めるだけでなく、今後、稀少 RI の質量測定が大きく進展することが期待される。なお、博士論文の研究成果の一部は、すでに以下の3編の論文に投稿され、出版されている。

1、Y. Abe et al., Physica Scripta, T166 (2015) 014047.

2、Y. Yamaguchi et al., Physica Scripta, T166 (2015) 014056.

3、山口由高 他, 「加速器」 Vol. 12, No. 3, (2015) 132-141.

出版された雑誌は、いずれも原子核実験／加速器科学の分野では著名な雑誌である。このうち、1の論文は、阿部氏が筆頭著者としてまとめられたものである。

〔結論〕

平成28年2月10日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において、審査委員全員の出席のもと、本論文について著者に説明を求め、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。

よって、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。