

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14751

研究課題名（和文）新しい等時性調整方法の確立による宇宙元素合成過程の解明

研究課題名（英文）Elucidation of nucleosynthesis scenario by establishing a new isochronism tuning method

研究代表者

洲崎 ふみ（Suzaki, Fumi）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：70779727

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：稀少RIリングはRプロセス解明のため不安定核の質量精密測定を行う装置である。高精度の質量測定にはリング周回粒子が運動量によらず同一周期で周回する（等時性）状態が高精度で成立する必要がある。本研究はより不安定な核の質量測定に向けて高い真空度で利用可能な新しい等時性調整の方法を確立し、質量測定精度を保証することを目指した。研究期間全体を通じてRFキャビティと既存の共鳴ショットキーピックアップを組み合わせた新しい等時性調整手法に関してビーム実験には至らなかったものの、稀少RIリング実験において共鳴ショットキーピックアップによる等時性調整を実施したデータの解析により新手法の実現につながる知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鉄より重い元素がどのようにできたのか、という疑問に答える仮説として、原子核が一気に中性子を吸収して崩壊し原子番号を増やして進むRプロセスがある。Rプロセス解明のため経路上核の質量精密測定を行う稀少RIリングが理化学研究所に建設された。研究成果である稀少RIリング実験における共鳴ショットキーピックアップの等時性調整手法の実現とデータ解析により、RFキャビティの設計や現手法への課題等の知見を得た。本研究により得た知見は高い真空度でも適用可能な新しい等時性調整手法の確立に活用できるため、将来稀少RIリングで実施するより不安定な核の質量精密測定の実現とRプロセス解明に大きな進展をもたらす。

研究成果の概要（英文）：Rare-RI Ring is a storage ring for precise mass measurement of unstable nuclei to elucidate the r-process. For accurate mass measurement, it is necessary to establish a state of isochronism, in which particles circulating the ring have the same period regardless of their momentum, with a high degree of accuracy. This study aims to establish a new isochronism tuning method that can be used at high vacuum, which is necessary for the mass measurement of more unstable nuclei, and to guarantee the accuracy of the mass measurement. Although the new isochronism tuning method combining a RF cavity and the existing resonant Schottky pick-up was not tested in beam experiments during the entire research period, analysis of data obtained from Rare-RI Ring experiments with the resonant Schottky pick-up isochronism tuning provided insight into the realization of the new method.

研究分野：原子核物理学

キーワード：イオン蓄積リング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) R プロセス経路決定のための質量精密測定

宇宙の元素合成において、鉄より陽子や中性子が多い元素がどのようにできたのか。これは未だに解明されていないミステリーである。答えの候補の元素合成過程として、二中性子星合体や超新星爆発などの爆発的現象により中性子を獲得して進む R プロセスがある。R プロセスの経路を決定するためには経路上の核の質量測定が必要であるが、R プロセスの経路は中性子過剰な領域を進み、経路上の核は短寿命(~10 ミリ秒)・低生成率(~1 日 1 個)の“稀少 RI”であるため実験が困難であった。理化学研究所に所在する RI ビームファクトリー(RIBF)は、様々な加速器と超伝導 RI ビーム生成分離装置、さらに多くの実験装置からなる加速器施設であり、大強度ビームにより稀少 RI を含む多種多様な原子核を生成し実験で利用することができる。RIBF の最下流に建設された稀少 RI リングは生成された稀少 RI の質量精密測定を行う蓄積リングである。

(2) 質量精度と等時性の到達精度

稀少 RI リングの目標の質量決定精度は 10^{-6} である。稀少 RI リングでは等時性質質量測定方法を用いて質量を決定する。この方法では、リング内部の等時性(周回する粒子が運動量にかかわらず同一周期で周回する状態)が 10^{-6} の精度で達成されている必要があるが、研究開始当初の等時性の達成度は 10^{-5} のオーダーであり、目標に達していなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、稀少 RI リングを用いた質量測定において、高度な等時性調整を行うことにより、質量精度を保証することである。稀少 RI リングにおける等時性調整手法には、現存する共鳴ショットキーピックアップを用いたものがある。この手法では、稀少 RI リング内部の残留ガスにより、周回粒子がエネルギーを失い、運動量を減少させることを利用して等時性の達成度をモニタリングし、調整に用いる。真空度の向上に従い、残留ガスは減少するため稀少 RI リング内部の真空度がよい状況でこの手法は利用できない。将来稀少 RI リングにおける質量測定は、高い真空度が必要な、より中性子過剰側の不安定核を対象とすることが予想されるため、高い真空度でも利用できる RF キャビティと共鳴ショットキーピックアップを組み合わせた等時性の調整手法を考案し、実現することを目標とした。

3. 研究の方法

稀少 RI リングにおける質量精密測定において、高度な等時性を達成するため以下の方法を用いる。

(1) 稀少 RI リングにおける質量精密測定と等時性調整

稀少 RI リングにおける質量精密測定では、等時性質質量測定法を用いる。この方法ではリング内部を周回する粒子がどのような運動量を持っていても同一周期で周回する(等時性)を達成した状況で周回粒子の飛行時間測定から質量を導出する。リングの等時性は、トリムコイルを用いて作られた磁場により実現する。図 1 に構成を示した稀少 RI リングは、双極子電磁石 4 つを 1 つのセクターとして 6 セクター合計 24 個の電磁石で構成された蓄積リングである。1 セクターの 1 つ目と 4 つ目の電磁石にはトリムコイルが付加されている。稀少 RI リングではトリムコイルを使って、動径方向外側に向かって強くなる磁場を形成し、稀少 RI リングを周回する粒子のうち運動量が大きく外側を周回する粒子がより強い磁場を受けるようにすることで、それぞれの粒子が持つ運動量の大小にかかわらず一定の周期で周回することを可能にする。稀少 RI リング内部の等時性の達成度を知り、トリムコイルに与える電流を調整することが稀少 RI リングにおける等時性調整である。

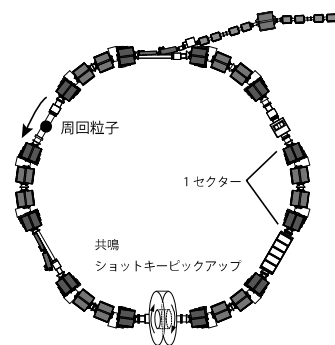


図 1 稀少 RI リング

(2) 等時性調整の方法

共鳴ショットキーピックアップを用いた等時性調整

等時性調整の際に稀少 RI リング内部の等時性の達成度を知るためのモニターとして、共鳴ショットキーピックアップは有用である。共鳴ショットキーピックアップは稀少 RI リングに設置された非破壊検出器であり、図 2 に示すようにビームダクトの周りを共鳴空洞が覆う構造をしている。周回粒子が共鳴空洞を周期的に通過することにより、共鳴空洞に固有な共鳴周波数において、共鳴空洞内にモノポールモードの変動磁場が誘起する。変動磁場を共鳴空洞内のピックアップループで取り出すことにより、時間経過に従う誘起信号を獲得できる。取り出した時間信号は、リアルタイムスペクトラムアナライザ内で逆フーリエ変換されることで周波数信号になる。共鳴周波

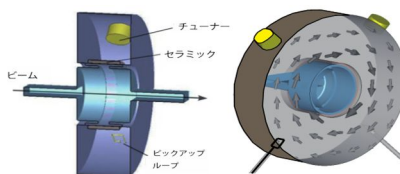


図 2 共鳴ショットキーピックアップ

数は周回周波数の整数倍であることを利用して、得られた信号から周回する粒子の周回周波数をリアルタイムで知ることができる。リアルタイムに得た周回周波数の時間経過をプロットしたものをショットキースペクトラムと呼ぶ。実験時の真空度 (10^{-5} Pa 程度)において、周回粒子はリング内部の残留ガスと相互作用して起こる運動量変化に従い周回周波数が変化する。等時性が高度に成立している場合は、運動量変化に対して一定の周回周波数が観測されることが予想できる。図3に共鳴ショットキーピックアップを用いた理想的な等時性調整の模式図を示した。三角形のマーカーが示すショットキースペクトラムが得られた際、トリムコイルを調整して丸のマーカーが示す一定の周波数を持つショットキースペクトラムが得られれば等時性の達成度が上がったと判断できる。このように稀少 RI リングの等時性の達成度を短時間でほぼリアルタイムに得られる手段として共鳴ショットキーピックアップを用いた手法は有用である。

RF 空洞を用いた等時性調整の提案

上記に示した共鳴ショットキーピックアップを用いた等時性調整手法は、残留ガスとの相互作用により起こる周回粒子の運動量変化を利用している。将来稀少 RI リングでより不安定な原子核の質量測定を行う際には、高い真空度で行うことが予想されるためこの手法は適用できない。そこで、既存の共鳴ショットキーピックアップと RF キャビティを組み合わせた新しい手法を考案し実現することを目指した。図4に提案する新しい等時性調整法の原理を示した。高い真空度では周回粒子は残留ガスと相互作用せず運動量変化が起こらない。そこで稀少 RI リングに運動量を外部から制御できる RF キャビティを設置し、周回粒子に任意の運動量変化を与え、既存の共鳴ショットキーピックアップのショットキースペクトラムをモニタリングすることにより等時性調整が可能になる。

4. 研究成果

本研究において目標としていた RF キャビティを用いた等時性調整手法の実現に関して、ビーム実験の実施に至らなかったものの、稀少 RI リングの質量測定および稀少 RI リングの実験において従来のショットキーピックアップを用いた等時性調整が実現し、データの詳細な解析により重要な知見を得た。

(1) 稀少 RI リングにおける質量精密測定

稀少 RI リングにおける質量測定は、中性子過剰な Ni 近傍核の質量測定から始まり、近年においては中性子過剰な Pd 近傍核の質量測定に成功した[H.F. Li et al., Physical Review Letters, 128(2022)]。

(2) 稀少 RI リングの実験における等時性調整

共鳴ショットキーピックアップを用いた等時性調整の手法を稀少 RI リングの実験において実施した結果を示す。図5(1)に等時性調整を行う前の周回する ^{78}Ge によるショットキースペクトラムを示した。このときの周回周波数は 46 Hz の広がりを持っていた。図5(2)に等時性調整後のショットキースペクトラムを示した。周回周波数の広がりには 15 Hz となり等時性の達成度は 10^{-6} のオーダーに到達した。 ^{78}Ge のデータ解析の際、周回粒子の持つエミッタンスが運動量変化に対する周回周波数変化に与える影響を考慮してシミュレーション計算を行う必要がある。また、実験を通じて既存の共鳴ショットキーピックアップについて、観測可能な共鳴周波数の幅が狭く、目的とする核のショットキースペクトラムをサーチして獲得することが難しいという課題が見つかった。観測可能な共鳴周波数の幅を広げることと、1 粒子の微小な信号をとらえる高感度を持つことはトレードオフであるためバランスを取る必要があるということがわかった。本研究により得られた知見と整備した機器により今後も新しい等時性調整手法の確立を目指して開発を進める。

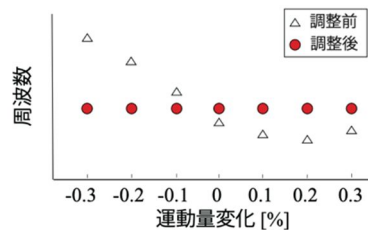


図3 等時性調整

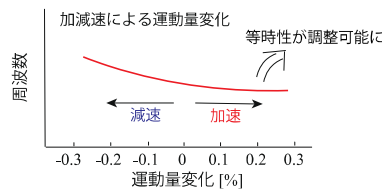
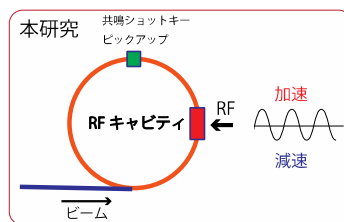
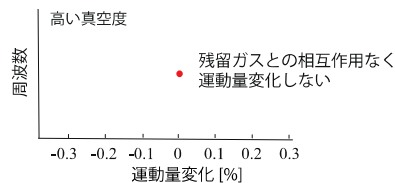


図4 新しい等時性調整手法

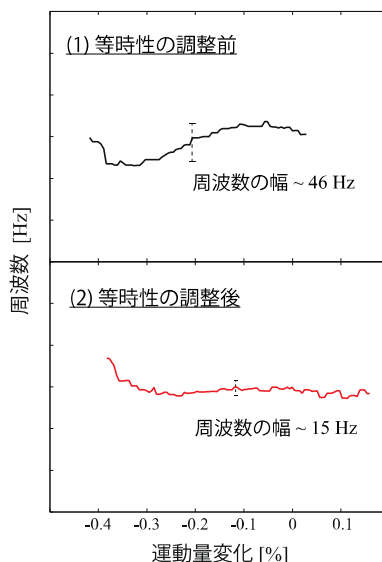


図5 実験における等時性調整

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 F. Suzaki, Y. Abe, M. Wakasugi, Y. Yamaguchi	4. 巻 52
2. 論文標題 Fine tuning of isochronism in Rare RI Ring using resonant Schottky monitor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 51-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H.F. Li, S. Naimi, T.M. Sprouse, M.R. Mumpower, Y. Abe, Y. Yamaguchi, D. Nagae, F. Suzaki, M. Wakasugi, et al.	4. 巻 128
2. 論文標題 First Application of Mass Measurements with the Rare-RI Ring Reveals the Solar r-Process Abundance Trend A=122 and A=123	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.128.152701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------