

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14730

研究課題名（和文）稀少RIリングを用いた未踏核種の精密質量測定による金、白金の起源解明

研究課題名（英文）Investigation of the origin of heavy elements via precise mass measurements of unexplored nuclei by using Rare RI Ring

研究代表者

向井 もも（Mukai, Momo）

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：10823726

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：稀少RIリング（理化学研究所/RIBF）での不安定原子核の精密質量測定のために、低物質密度かつ高時間分解能の飛行時間検出器を開発した。高エネルギーイオンビームを用いて、本検出器の検出効率・時間分解能の通過ビームの原子番号依存性を確認した。本研究課題での開発により、精密質量測定に要求される性能を達成でき、稀少RIリングでの実用を開始した。さらに、本研究課題で開発した飛行時間検出器の原理を応用して、従来の位置検出器にかわる低物質密度かつ非破壊の位置検出器開発に着手した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題により、約20 psの高時間分解能での高エネルギーイオンビームの飛行時間検出が可能となった。開発した検出器はビームの通過物質が薄膜一枚のみであり、従来のプラスチックシンチレータ等による通過ビームのエネルギー損失などの影響を1/100以下に抑えられる。本検出器を利用することで、稀少RIリングでの精密質量測定をはじめ、高エネルギーイオンビームを用いた施設で稀少な原子核の様々な核分光実験を実施でき、重元素合成過程の解明に寄与することができる。

研究成果の概要（英文）：We developed a high-resolution time-of-flight (TOF) detector with low material-density for precise mass spectroscopy of unstable nuclei in Rare-RI-Ring (RIKEN/RIBF). The dependency of detection efficiency on the beam atomic number and time resolution of the TOF detector were investigated using high-energy ion beams. Our TOF detector has satisfied with the performances required for the precise mass spectroscopy in Rare-RI-Ring. The physics experimental programs in Rare-RI-Ring with the TOF detector are ongoing. Based on the technique of the present TOF detector, we are also developing a position sensitive detector with low material-density for the further precise mass-measurement in Rare-RI-Ring.

研究分野：原子核物理学

キーワード：飛行時間検出器 位置検出器 質量測定

1. 研究開始当初の背景

身の回りに存在する金や白金などの鉄より重い元素の約半分以上は、宇宙の中での爆発的な天体環境により生成されたと考えられている。高温・高中性子密度の天体環境中で、種となる軽い原子核が周囲の中性子を次々に吸収する過程（早い中性子捕獲過程：r過程）と β -崩壊が競合しながら、重い原子核（重元素）が合成されたと考えられている。しかし未だに検証できておらず、重元素の起源は未解決である。合成経路は、天体環境及び原子核の性質に応じて決まる。詳細な天体環境が未解明である原因の一つに、合成に關与する中性子過剰核が生成困難であるため、質量等の性質が未知であることが挙げられる。理化学研究所にあるRIビームファクトリー（RIBF）は、大強度高エネルギー重イオンビームを用いた核破砕反応により、これまで実験的研究が困難だった不安定核（Radio Isotope：RI）を高エネルギーイオンビームとして利用可能にした。更に、RIBFのビームラインに連なる蓄積リング（稀少RIリング）の開発により、稀少な不安定核の精密質量測定が可能になった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、稀少RIリングによる重元素合成に關与する不安定核の精密質量測定である。稀少RIリングはイオンの個別入射と等時性磁場（運動量によらず同じ周回時間）を特徴とする蓄積リングである。高エネルギー重イオンビームの核破砕反応で生成した多種の原子核を破砕片分離装置（BigRIPS）により選別し、特定の質量電荷比を持つ高エネルギーイオン（核子当たり百数十 MeV）をリング内に導入する。イオンはリング内で数 ms の間に数千周し、その飛行時間から質量値を決定する。天体環境解明のために必要とされる質量精度 10^{-6} を達成するためには、飛行時間を 10^{-6} 、イオンの飛行速度を 10^{-4} 以下の精度で決定する必要がある。そのためには、使用する飛行時間検出器の時間分解能は 100 ps 以下でなくてはならず、また飛行時間のスタートタイミングを与える飛行時間検出器では、検出器通過によるビームのエネルギー損失を可能な限り抑える必要がある。従来の、薄くとも数百マイクロメートルの厚さをもつプラスチックシンチレータでは 2 つ目の条件を満たすことができない。よって本研究課題では始めに、精密質量測定に向けた高時間分解能・低物質質量の飛行時間検出器開発を行った。

稀少RIリングで実験を行う際には、ビーム輸送調整や飛行時間の補正のために、ビームライン上の各所でビーム通過位置を知る必要があり、位置検出器を使用している。しかし、従来使用されてきたガスと複数の薄膜を使用する位置検出器（平行平板型雪崩計数管 PPAC、位置分解能 < 0.5 mm）では、検出器内でのエネルギー損失に由来するビームの速度変化が稀少RIリングで測定した質量の不定性に影響している可能性が示唆された。そこで、PPACに代わる、極低物質質量の位置検出器として、飛行時間検出の原理（後述）を応用した位置検出器の開発も行った。

3. 研究の方法

図1に本研究課題で開発・試験した飛行時間検出器と位置検出器の概要図を示す。各検出器は二次電子発生用の一枚のアルミ蒸着マイラー膜（以下、薄膜）、複数の電極板、永久磁石、二次電子検出用のマルチチャンネルプレート（MCP）検出器で構成されている。MCP検出器には、高速応答の浜松ホトニクス社製 F9892-13 を採用した。アルミ蒸着マイラー膜は、 $1\ \mu\text{m}$ の厚さのマイラー膜の両面に、イオンビーム通過時に二次電子を誘発させるために $100\ \text{nm}$ 厚さのアルミニウムを蒸着した。イオンビームが薄膜を通過すると、薄膜から二次電子が誘発される。飛行

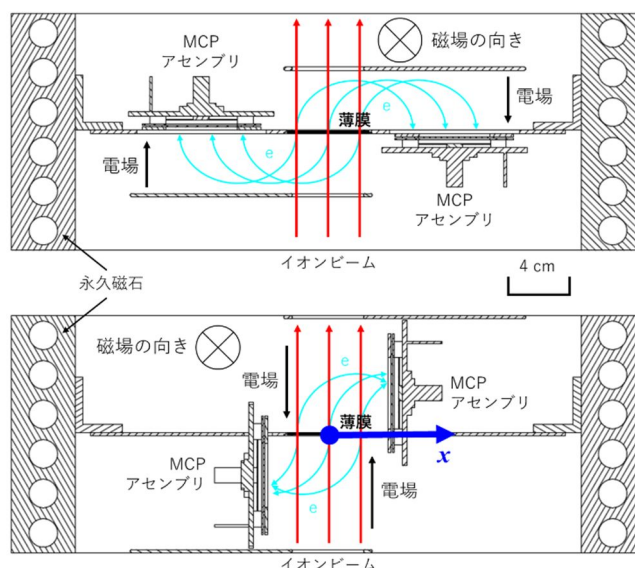


図1 飛行時間検出器（上）と位置検出器（下）の断面図。

時間検出器では、交差した電場と磁場により二次電子を 180 度偏向させ、MCP 検出器で検出する。電場と磁場の等時性条件を満たすことにより、二次電子の MCP 検出器への到達時間を誘発位置に依存しないようにすることができ、数 10 ps オーダーの高い時間分解能を達成することができる。二次電子は 180 度偏向した位置では等時性よく検出されるが、約 90 度の位置では発生位置 x に応じておおよそ線形に、到達時間が変化する。そのため 90 度の位置に MCP 検出器を設置することで位置検出器を構成した。検出器一台につき、一次元座標の検出が可能である。電場と荷電粒子軌道のシミュレーションソフトウェア SIMION を用いたシミュレーションによると、二次電子輸送時間の誘発位置依存性は、電磁場設定に依存するが、典型的に数 10 ps/mm である。前方と後方に設置した 2 台の MCP 検出器で検出した輸送時間の差を利用すると、さらに位置感度が 2 倍に向上する。

要求される飛行時間分解能と位置分解能を実現するために、線を用いたオフライン試験で、薄膜全体で検出効率の良い電磁場設定を探索した。この検出器条件を、本番に近い実験条件で確認するために、放射線医学総合研究所で核子当たり 200 MeV のクリプトン (Kr, 原子番号 $Z = 36$) ビームを使用して、薄膜全体での検出効率・時間分解能/位置分解能測定を行った。二次電子数は検出効率に直接影響するため、製作した薄膜ではどの程度の原子番号の入射ビームまで良い効率で測定できるのか調べておく必要がある。二次電子数は物質内でのビームのエネルギー損失に依存する。核子破碎反応で生成された二次粒子のビーム速度はほぼ同じであるため、二次電子数はビームの原子番号に依存する。そこで、二次ビームも使用して、 $Z=5 \sim 36$ のビームに対する検出効率を評価した。

4. 研究成果

高エネルギーイオンビームを用いて行った、飛行時間検出器・位置検出器の性能試験結果の概要を示す。

・飛行時間検出器の検出効率・時間分解能

薄膜全体に核子当たり 200 MeV の Kr ビームを入射し、薄膜を通過したイベント数と 2 台の MCP 検出器で二次電子を同時検出したイベント数を比較し、検出効率を評価した。薄膜上のビーム通過位置は、検出器前後に設置した位置検出器 PPAC で測定した位置の内挿から求めた。薄膜のエッジを除く全面で約 90% の検出効率を得られた。(図 2 左) 薄膜のエッジを除く範囲にゲートをかけた MCP 検出器の時間スペクトルから時間分解能を評価した。時間分解能は、測定回路の分解能を含めて約 20 ps であった。

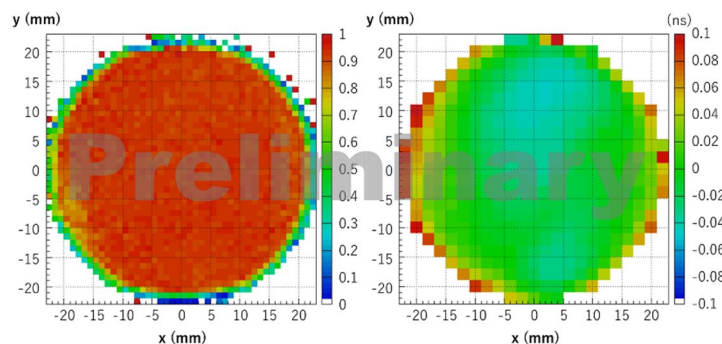


図 2 飛行時間検出器の検出効率 (左) 及び二次電子の平均輸送時間 (相対値、右) のビーム入射位置依存性。

・検出効率の入射ビームの原子番号依存性

核子当たり 290 MeV のアルゴン (Ar, $Z = 18$) ビームとベリリウム標的による核破碎反応により生成した $Z = 5 \sim 18$ までの二次ビームを薄膜に照射した。二次ビームのエネルギーは核子当たり 176 ~ 189 MeV である。図 3 に、二次ビーム及びエネルギーを変えた一次ビーム (Ar 核子当たり 142 ~ 276 MeV, Kr 核子当

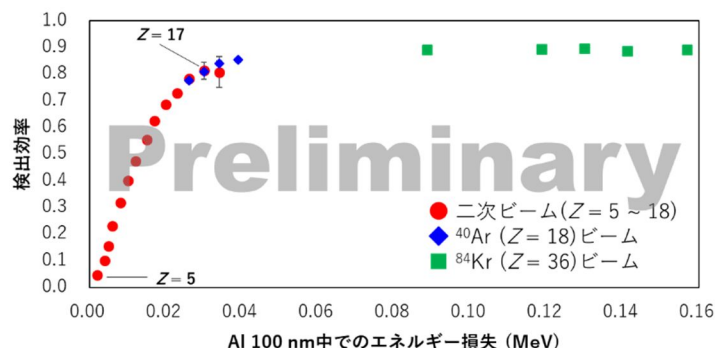


図 3 検出効率の入射ビーム原子番号依存性。横軸は各ビームのアルミ層 (100 nm) でのエネルギー損失に変換している。アルミ層厚さ及びビームエネルギーの誤差は考慮していない。

り 139 ~ 378 MeV) で測定した検出効率を示す。横軸はビームエネルギーから計算した、アルミ層 (100 nm) でのエネルギー損失である。原子番号が小さく、アルミ層内でのエネルギー損失が小さいほど検出効率は小さくなった。二次電子発生物質にアルミニウムを用いる場合、核子当たり 180 MeV 程度のビームエネルギーなら $Z = 17$ 以上、またはエネルギー損失が 0.03 MeV/100 nm 以上である入射ビーム条件の場合に 80%以上の検出効率を得られることがわかった。これより低い Z 、または小さいエネルギー損失の入射ビームの場合には、アルミニウムよりも Z の大きい物質を利用する必要がある。

・位置検出器の検出効率・位置分解能

飛行時間検出器と同様に、薄膜全体に核子当たり 200 MeV の Kr ビームを照射し、検出効率と位置分解能を測定した。薄膜上の一次元 (x 方向) のビーム入射位置と 2 台の MCP 検出器で測定した二次電子の輸送時間差の関係 (図 4 上) から、位置校正式を決めた。二次電子輸送時間差のビーム入射位置依存性は約 82 ps/mm であり、SIMION によるシミュレーション結果とよく一致した。電磁場が大きいほど二次電子の検出効率は良く、検出器中心磁場が 72 ガウスの場合に、薄膜のエッジ付近を除くほぼ全域で約 85%の検出効率を得られた。しかしながら、測定した二次電子輸送時間のビーム入射位置依存性を解析すると、位置相関を示すイベントと示さないイベントが約半数ずつであった。位置相関のあったイベントでは、適切な補正により位置精度は ± 0.5 mm 以内、位置分解能は <1.5 mm (図 4 下) となった。得られた位置分解能は測定回路の時間分解能を考慮したシミュレーション結果よりも約 2 倍悪い。また、位置相関がないイベントは、MCP 検出器の時間スペクトルのテールに由来することがわかった。これらの原因は調査中である。

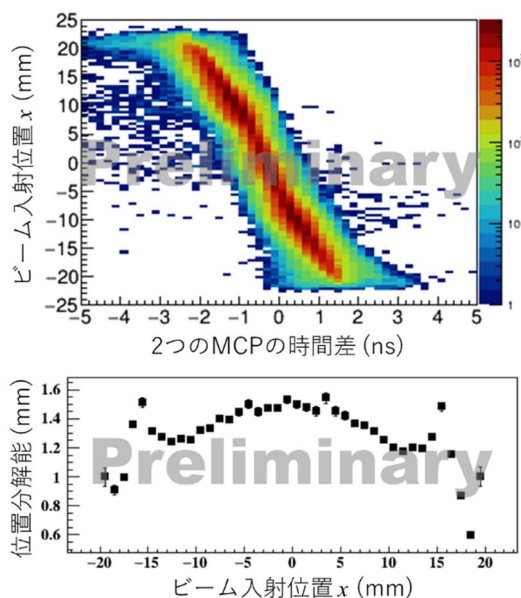


図 4 上: ビーム入射位置と二次電子輸送時間差の関係。下: 各ビーム入射位置における位置分解能 (位置校正及び補正後)。

本研究課題で開発した飛行時間検出器は、稀少 RI リングでの精密質量測定に要求される低物質量・高効率・高時間分解能を達成し、実用可能となった。二年目には、稀少 RI リングのマシン性能評価実験で使用し、期待通りの性能で安定動作することが確認できた。三年目には、稀少 RI リングでの宇宙元素合成に関与する中性子過剰核周辺の質量測定実験で本検出器を使用した。一方、位置検出器は位置分解能がシミュレーション値よりも悪いこと、全検出イベントのうち約半数が位置との相関を示さないことがわかった。実用化に向けて、これらの課題の解決と有効な検出面積の拡大が必要である。位置検出器の実験結果は、筑波大学大学院生要直登氏の修士論文として発表した。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 向井もも	4. 巻 1
2. 論文標題 RIビーム飛行時間検出器の開発 - 理研稀少RIリングのための検出器 - Development of time of flight detectors for RI beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2019年度放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用研究報告書	6. 最初と最後の頁 169-170
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 向井もも
2. 発表標題 薄膜を利用した飛行時間検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会（素核宇）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Mukai
2. 発表標題 Measurement of nuclear magnetic dipole moments of 196-198Ir from laser spectroscopy at KISS
3. 学会等名 INPC2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 要直登
2. 発表標題 薄膜からの二次電子放出を利用したRIビーム位置敏感型検出器の開発
3. 学会等名 日本量子医科学会第1回学術大会
4. 発表年 2021年

〔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
---------	---------