

**PRESS RELEASE**

2022年4月28日

 理化学研究所、筑波大学  
 埼玉大学、東京大学大学院理学系研究科

## 元素起源の謎の解明に向けた世界最速質量測定が始動

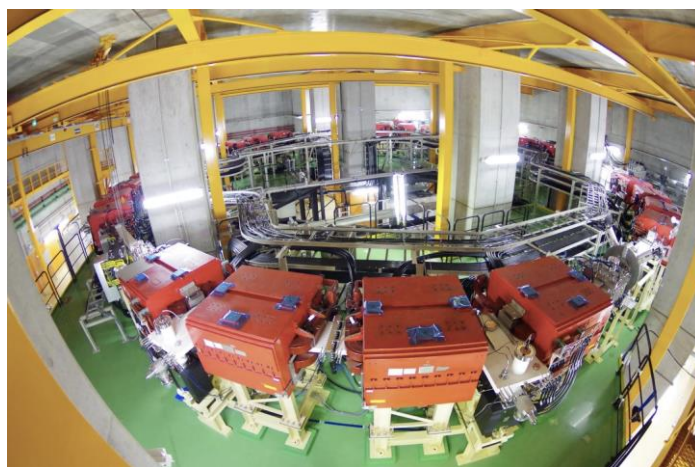
### — 稀少 RI リングを用いた短寿命放射性同位体の質量決定に成功 —

理化学研究所（理研）仁科加速器科学研究センター スピン・アイソスピン研究室 サラ・ナイミ 研究員（研究当時）、ホンフー・リー 国際プログラム・アソシエイト（研究当時）、上坂友洋 室長、短寿命核質量測定装置開発チームの山口由高 技師、筑波大学数理物質系の小沢顕 教授、埼玉大学大学院理工学研究科の山口貴之 准教授、東京大学大学院理学系研究科の道正新一郎 助教らの国際共同研究グループ※は、RI ビームファクトリー<sup>[1]</sup>の「稀少 RI リング<sup>[2]</sup>」を用いて、新たに確立した超高速質量測定法により、極短寿命同位体（RI）の一つである中性子過剰なパラジウム-123 ( $^{123}\text{Pd}$ : 原子番号 46、中性子数 77) 核の質量を精密に決めることに初めて成功しました。

本研究成果は、鉄よりも重い元素の起源の解明に向け、速い中性子捕獲過程（r 過程）<sup>[3]</sup>に関わる多くの稀少 RI の質量精密決定への道を開くものです。

今回、国際共同研究グループは、周回時間の等時性<sup>[4]</sup>という特性を持つ稀少 RI リングと RI を 1 個ずつ識別しながらリングに入射する個別入射法<sup>[5]</sup>を組み合わせ、リング内で粒子を約 0.7 ミリ秒飛行させた後、粒子の種類による到着時間の差（ズレ）から質量を導出することで、世界最速で精密な質量決定を実現させました。この手法により、 $^{123}\text{Pd}$  核とその周辺の原子核の質量を、その寿命より短い時間で測定できることを実証しました。その結果、太陽系で観測されている質量数 122 と 123 の元素比をよく説明できることが明らかになりました。

本研究は、科学雑誌『*Physical Review Letters*』オンライン版（4月15日付）に掲載されました。



RI ビームファクトリー内に建設された稀少 RI リング

## ※国際共同研究グループ

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

スピン・アイソスピン研究室

研究員（研究当時） サラ・ナイミ（Sarah Naimi）

（現 同客員研究員）

国際プログラム・アソシエイト（研究当時） ホンフー・リー（Hongfu Li）

協力研究員 長江 大輔（ながえ だいすけ）

室長 上坂 友洋（うえさか ともひろ）

実験装置開発室

短寿命核質量測定装置開発チーム

技師 山口 由高（やまぐち よしたか）

基礎科学特別研究員 阿部 康志（あべ やすし）

室長 若杉 昌徳（わかすぎ まさのり）

筑波大学 数理物質系

教授 小沢 顕（おざわ あきら）

埼玉大学 大学院理工学研究科

准教授 山口 貴之（やまぐち たかゆき）

東京大学 大学院理学系研究科 附属原子核科学研究センター

助教 道正 新一郎（みちまさ しんいちろう）

中国科学院近代物理研究所、ロスアラモス国立研究所（米国）、

韓国基礎科学研究所 CENS、重イオン研究所 GSI（独国）、サレー大学（英国）

## 研究支援

本研究は、RIKEN Pioneering Project「Extreme precisions to Explore fundamental physics with Exotic particles（山崎泰規、香取秀俊）」、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金基盤研究（C）「Elucidation of the r-process second peak from key nuclear mass measurements at N=82 with the Rare-RI Ring at RIKEN/RIBF（研究代表者：Naimi Sarah）」、同基盤研究（B）「蓄積された多価イオン状態の不安定核ベータ崩壊と宇宙元素合成の環境（研究代表者：山口貴之）」、同新学術領域研究（研究領域提案型）「二重魔法数エキゾチック核Ni-78の質量精密測定（研究代表者：山口貴之）」「新型飛行時間検出器によるNi同位体の質量測定（研究代表者：小沢顕）」、同基盤研究（A）「多価イオン状態の不安定核のための新しい寿命測定法の確立と宇宙元素合成過程への応用（研究代表者：山口貴之）」「蓄積リングでの質量測定によるハロー原子核の探索（研究代表者：小沢顕）」、同若手研究（B）「稀少RIリングにおける質量測定とその高効率化（研究代表者：阿部康志）」による支援を受けて行われました。

## 1. 背景

約 138 億年前、ビッグバンにより誕生した直後の宇宙に存在していた元素は、原子番号 1 の水素（H）と原子番号 2 のヘリウム（He）だけでした。その後、水素やヘリウムは星内部の高密度・灼熱環境下でゆっくりと融合することで重い元素へと姿を変え、その星が生涯を終えるときに宇宙空間にばらまかれたと考えられています。しかし、このシナリオだけでは、最も安定な原子番号 26 の鉄（Fe）までしか合成されず、原子番号 79 の金（Au）や原子番号 92 のウラン（U）

などの重い元素（重元素）は合成されません。

重元素が合成される主なメカニズムの候補には、「s 過程<sup>[6]</sup>と呼ばれる遅い中性子捕獲過程と「r 過程」と呼ばれる速い中性子捕獲過程の二つがあります。r 過程は、ウィリアム・ファウラー博士らが 1950 年代に提唱したもので、「重元素は超新星爆発<sup>[7]</sup>のような激しい環境下で、多くの短寿命放射性原子核を経由して合成された」という仮説によるものです。しかし、r 過程がどこでどのように起こったかはまだ検証されておらず、元素の起源（重元素合成）における最大の謎となっています。

r 過程の解明が困難な理由として、超新星爆発がまれにしか起こらず、r 過程の証拠となるガンマ線などの観測が難しいことが挙げられます。一方で 2017 年、米国の研究グループが連星中性子星合体<sup>[8]</sup>の重力波<sup>[9]</sup>観測に成功しました。これにより、二つの中性子星が合体する過程で高密度・高温状態（10 億℃）が出現し、この環境下で重元素が大量に合成されている可能性が示され、注目を集めています。

もう一つの理由は、地球上で r 過程の中間生成物である非常に不安定な原子核（r 過程核）を生成できなかったことです。原子番号 46 のパラジウム（Pd）を例にとると、地球上に自然に存在する安定同位体はパラジウム-102（<sup>102</sup>Pd：中性子数 56）とパラジウム-110（<sup>110</sup>Pd：中性子数 64）ですが、r 過程ではパラジウム-123（<sup>123</sup>Pd：中性子数 77）よりも中性子数の多い、「中性子過剰核」と呼ばれる同位体が関与します。中性子過剰核の生成は非常に難しく、21 世紀に入るまで合成することすらできませんでした。r 過程核のさまざまな性質はその進行速度や経由する原子核と深い関係があるため、その性質を知ることなく r 過程を理解することはできません。数ある特性の中でも、r 過程核の質量は r 過程の進行に最も決定的な影響を与えると考えられています。

2007 年に理研 RI ビームファクトリーが稼働を開始し、光速の 70%まで加速したウラン原子核の分裂により、地球上で初めて多くの r 過程核を生成できるようになりました。こうして生成された r 過程核を用いて、そのベータ崩壊寿命測定<sup>[10]</sup>やベータ遅延中性子放出率測定<sup>[11]</sup>が行われ、r 過程の研究が大きく進みました<sup>注 1、2)</sup>。しかし、100 ミリ秒以下の寿命を持つ r 過程核の質量を研究に必要な 100 万分の 1 の精度で決定することは困難でした。

注 1) 2015 年 5 月 12 日プレスリリース「重元素合成の鍵を握る中性子過剰核 110 個の寿命測定に成功」

[https://www.riken.jp/press/2015/20150512\\_1/index.html](https://www.riken.jp/press/2015/20150512_1/index.html)

注 2) 2017 年 2 月 17 日プレスリリース「中性子過剰核 94 種の寿命測定に成功」

[https://www.riken.jp/press/2017/20170217\\_1/](https://www.riken.jp/press/2017/20170217_1/)

## 2. 研究手法と成果

今回、国際共同研究グループは、RI ビームファクトリーに新たに建設された「稀少 RI リング」を用いて、個別入射法と等時性質質量測定を組み合わせた「超高速質量測定法」を確立し、r 過程核の一つである <sup>123</sup>Pd 核の質量測定に成功しました。稀少 RI リングは蓄積リング<sup>[12]</sup>と呼ばれる装置の一種です。蓄積リングを用いた従来型の質量測定法には、測定時間が 1 秒を超える場合や、RI ビーム

ファクトリーのようなサイクロトロン加速器施設には適用できないという短所がありました。今回確立した超高速質量測定法は、サイクロトロン加速器で生成される特定の時間構造を持たず、ランダムに飛来する不安定核ビームに対して質量を1ミリ秒以下で決定できるという特長を持っています。

稀少 RI リングは超高速質量測定に必要な等時性環境を広いエネルギー範囲で作ることができます。等時性とは、粒子がリングを一周するのにかかる時間が、粒子の持つエネルギーによらず質量だけに依存する性質です。「等時性質量測定」はこの性質を利用した手法で、従来型の蓄積リングを用いた質量測定で必要だった長時間のビーム冷却が不要なため、極めて短時間で質量を決定できます。実際には、粒子 (RI) をリング内で約 2,000 周飛行させ、粒子の種類による周回時間の差 (ズレ) から粒子の質量を決定しました。2,000 周するのにかかる時間は約 0.7 ミリ秒であり、これが測定時間となります。

また、等時性に加え、「個別入射法」の確立が超高速質量測定の実現には必須でした。RI ビームファクトリーの大強度重イオンビームを用いたとしても、 $r$  過程核はごくまれにしか生成されません。ごくまれというのは1分間に1個以下、最も稀少な核では1日に1個程度の頻度です。さらに、生成のタイミングは確率的に決まるため、いつ生成されるかを事前に予測することは不可能です。従来型の蓄積リングでは、粒子が入射するタイミングを事前に決めておく必要があったことから、従来型の質量測定法を RI ビームファクトリーの重イオンビームに効率的に適用することはできませんでした。今回、この困難を乗り越えるために、RI を1個ずつ識別しながらリングに入射する個別入射法を開発しました。

下図に、確立した超高速質量測定の概略を示します。まず、RI ビームファクトリーの主加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC) <sup>[13]</sup>からの重イオンビームと生成標的との反応により、 $r$  過程核を含む大量の同位体がランダムに生成されます。その粒子群から超伝導 RI ビーム分離発生装置 BigRIPS を用いて、研究対象粒子の周辺同位体だけを分離・選択します。その後、生成標的の約 30 メートル下流に置かれた粒子検出器により、到達した粒子が研究対象粒子かどうかを識別します。

識別された粒子は光速の 55% の速度で飛行し、約 1 マイクロ秒 ( $\mu\text{s}$ 、 $1\mu\text{s}$  は 1,000 分の 1 ミリ秒) 後に稀少 RI リングの粒子入射システム (キッカーシステム) に到達します。粒子入射システムは、到達した粒子が稀少 RI リングの安定軌道に入るように飛行方向を変える役割を果たします。一方、粒子検出器からの識別信号は光速の 95% で伝送できる同軸管を用いて、 $0.5\mu\text{s}$  で粒子入射システムまで伝送されます。つまり、粒子入射システムは粒子飛行時間の約  $1\mu\text{s}$  から信号伝送にかかる時間の  $0.5\mu\text{s}$  を差し引いた  $0.5\mu\text{s}$  弱で動作します。この粒子入射システムの実現により、ランダムに飛来する稀少粒子を検出器で選別した上で、粒子自身のタイミングで稀少 RI リングに入射させることが可能になりました。

超伝導リングサイクロトロン  
(SRC)

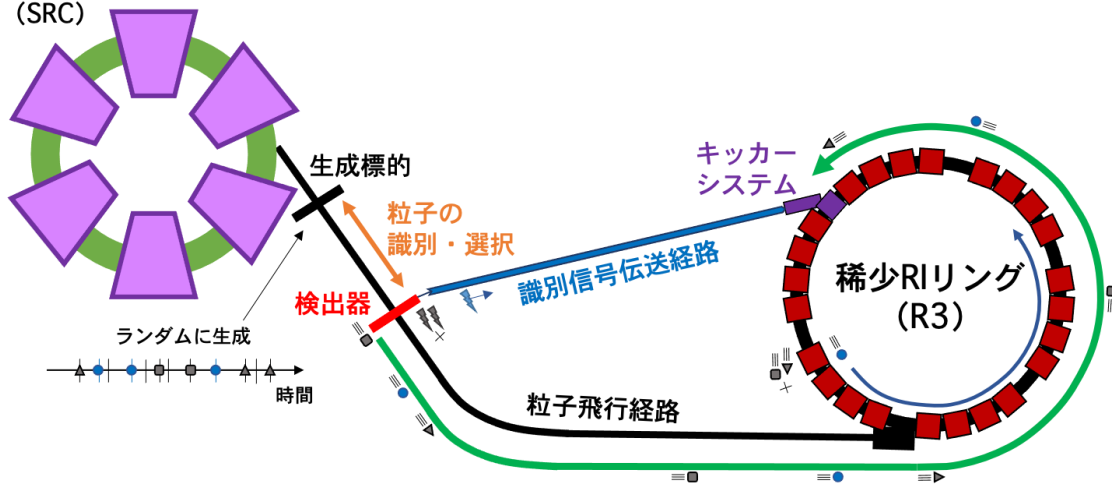


図 稀少 RI リングによる超高速質量測定法の概念図

左上の SRC からの重イオンビームと生成標的との反応により、 $r$  過程核を含む大量の同位体がランダムに生成される。その粒子群から BigRIPS 装置により、研究対象粒子の周辺同位体だけを分離・選択する。その後、生成標的の下流に置かれた検出器により、到達した粒子が研究対象粒子かどうか識別される。さらに、粒子は光速の 55% の速度で飛行し、約  $1\mu\text{s}$  後に稀少 RI リングの粒子入射システム（キッカーシステム）まで到達する（緑矢印）。一方、検出器の識別信号は光速の 95% で伝送できる同軸管（青線）により、稀少 RI リングまで  $0.5\mu\text{s}$  で伝送される。その結果、キッカーシステムは、 $0.5\mu\text{s}$  弱で動作可能である。

実験では、SRC で光速の 70% まで加速したウランのビームをベリリウム標的に衝突させ、生成された 166 個の  $^{123}\text{Pd}$  を稀少 RI リングに入射し、100 万分の 1 以下の精度でその質量を決定することに成功しました。そして、得られた  $^{123}\text{Pd}$  核の質量が重元素合成に与える影響を調べました。宇宙物理学計算を用いて、 $r$  過程が起こるとされる中性子星合体现象内部のさまざまな環境に対してコンピュータ・シミュレーションを行い、 $r$  過程核が中性子を捕える確率やベータ崩壊後の中性子を放出する確率など、 $r$  過程を支配する量に対する  $^{123}\text{Pd}$  核質量の影響を定量化しました。その結果、質量数 122 の元素が質量数 123 の元素に比べて過剰に生成されるという、太陽系で観測されている組成を初めて再現することができました。

### 3. 今後の期待

今回の結果により、稀少同位体である  $^{123}\text{Pd}$  の核の質量を決定しただけで、宇宙における重元素合成の理解が大きく進むことが分かりました。また同時に、稀少 RI リングを用いた超高速質量測定法が極短寿命な  $r$  過程核に対して極めて有効であることを示しました。

$r$  過程に関与する同位体は数百種類を大きく超え、その性質は宇宙での重元素の成り立ちを理解する上で重要です。今回確立された超高速質量測定法は RI ビームファクトリーにおける稀少同位体質量測定の新しい時代を開くものであり、今後  $r$  過程の理解に大きく貢献するものと期待できます。

## 4. 論文情報

<タイトル>

First Application of Mass Measurement with the Rare-RI Ring Reveals the Solar  $r$ -Process Abundance Trend at  $A = 122$  and  $A = 123$

<著者名>

H. F. Li, S. Naimi, T. M. Sprouse, M. R. Mumpower, Y. Abe, Y. Yamaguchi, D. Nagae, F. Suzuki, M. Wakasugi, H. Arakawa, W.B. Dou, D. Hamakawa, S. Hosoi, Y. Inada, D. Kajiki, T. Kobayashi, M. Sakaue, Y. Yokoda, T. Yamaguchi, R. Kagesawa, D. Kamioka, T. Moriguchi, M. Mukai, A. Ozawa, S. Ota, N. Kitamura, S. Masuoka, S. Michimasa, H. Baba, N. Fukuda, Y. Shimizu, H. Suzuki, H. Takeda, D.S. Ahn, M. Wang, C.Y. Fu, Q. Wang, S. Suzuki, Z. Ge, Yu. A. Litvinov, G. Lorusso, P. M. Walker, Zs. Podolyak and T. Uesaka

<雑誌>

*Physical Review Letters*

<DOI>

[10.1103/PhysRevLett.128.152701](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.152701)

## 5. 補足説明

### [1] RI ビームファクトリー

理研が所有する RI ビーム発生施設と独自の基幹実験設備群で構成される重イオン加速器施設。RI ビーム発生施設は、2 基の線形加速器、5 基のサイクロtronと超伝導 RI ビーム分離発生装置「BigRIPS」で構成される。世界最多の約 4,000 種の RI を生成できる。

### [2] 稀少 RI リング

理研で開発した、ごくまれにしか生成しない RI の質量測定に特化した蓄積リング。測定時間は 1 ミリ秒以下であることから、極短寿命な RI の質量測定に対応できる。高精度等時性下で  $r$  過程核の質量を系統的に測定することを主目的とする。

### [3] 速い中性子捕獲過程 ( $r$ 過程)

中性子を多く持つ不安定な原子核領域で起こる連鎖的核反応。 $r$  は rapid を意味する。鉄より重い元素のほぼ半分とトリウムやウランの全量の生成に関与する。中性子星同士の衝突や超新星爆発など宇宙の極限状態において瞬時に起こる現象と考えられており、その謎の解明が待ち望まれている。

### [4] 周回時間の等時性

蓄積リングの中で粒子が周回する際、一周するのにかかる時間が粒子の持つエネルギーによらず、質量だけに依存する性質。

### [5] 個別入射法

これまで難しいとされてきた、サイクロtron施設における蓄積リング実験を実現するために開発された入射手法。稀少な RI が生成されるのを待ち続け、生成された際

には確実に蓄積リングに入射することが可能である。

#### [6] 遅い中性子捕獲過程 (s 過程)

鉄より重い元素のうち、r 過程では作られない残り半分の生成に参与する連鎖的核反応過程。s は slow を意味する。r 過程とは異なり、数千万年の長いタイムスケールで安定原子核付近を経由して進行する。

#### [7] 超新星爆発

大質量の星（恒星）がその一生を終えるときに起こす大規模な爆発現象。太陽の約 8 倍より重い星の場合、核融合反応により中心核の質量が増えると、やがて陽子の電子捕獲反応が起きて、中心核内部に中性子過剰な原子核が増える。これによって電子の縮退圧が弱まり、重力収縮が打ち勝って一気に崩壊する（重力破壊型超新星爆発）。

#### [8] 中性子星合体

太陽の 1~2 倍の質量を持ち、半径が 10 キロメートル程度のコンパクト天体である中性子星が二つ融合する現象。2017 年に重力波を用いて初めて観測された。現在、鉄より重い元素の半分程度は中性子星合体现象中で生成されたという考えが有力視されている。

#### [9] 重力波

宇宙で起こる大規模な爆発や重い質量同士の衝突の際に放射される時間・空間の歪み。アインシュタインが波として伝わりと予言していたが、その振幅は小さくかつ距離に比例して減衰していくため、観測は難しいとされてきた。2015 年 9 月にアメリカの重力波望遠鏡 LIGO でブラックホールの合体に起因した重力波を世界で初めて観測した。

#### [10] ベータ崩壊寿命測定

ベータ崩壊とは、ベータ線（電子）とニュートリノを放出する放射性崩壊の一種である。不安定核がベータ崩壊する寿命は r 過程の進行速度を決定づけるため、元素合成研究において重要な役割を果たす。不安定核が検出器中に停止した時間・位置およびその不安定核が崩壊する際のベータ線放出時間を精度良く測定し寿命を決定する。RI ビームファクトリーでは、EURICA 国際共同研究により r 過程核の寿命が測定された。

#### [11] 中性子放出率測定

中性子過剰核がベータ崩壊の後中性子を放出する確率を測定する実験手法。中性子放出率は、r 過程後の元素存在比に影響を与えるため、元素合成研究において重要な役割を果たす。RI ビームファクトリーでは、BRIKEN 国際共同研究により r 過程核の中性子放出率が測定された。

#### [12] 蓄積リング

磁場や静電場内で荷電粒子（電子、陽子、重イオン、分子イオン、クラスターイオン、など）を回し続けるための円形状の装置。ローレンツ力を円運動の中心を向く力（向心力）となるよう磁界の向きをとると、荷電粒子は等速円運動をする。

### [13] 超伝導リングサイクロトロン (SRC)

サイクロトロンの心臓部に当たる電磁石に超伝導を導入し、高い磁場を発生できる世界初のリングサイクロトロン。全体を純鉄のシールドで覆い、磁場の漏洩を防ぐ自己漏洩磁気遮断の機能を持っている。総重量は 8,300 トン。この SRC を使うと、非常に重い元素であるウランを光速の 70%まで加速できる。また、超伝導という方式によって従来の方法に比べ 100 分の 1 の電力で動かせるため、大幅な省エネも実現している。

## 6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

スピン・アイソスピン研究室

研究員 (研究当時) サラ・ナイミ (Sarah Naimi)

国際プログラム・アソシエイト (研究当時) ホンフー・リー (Hongfu Li)

室長 上坂 友洋 (うえさか ともひろ)

短寿命核質量測定装置開発チーム

技師 山口 由高 (やまぐち よしたか)

筑波大学 数理物質系

教授 小沢 顕 (おざわ あきら)

埼玉大学 大学院理工学研究科

准教授 山口 貴之 (やまぐち たかゆき)

東京大学 大学院理学系研究科

助教 道正 新一郎 (みちまさ しんいちろう)

<機関窓口>

\* 今般の新型コロナウイルス感染症対策として、理化学研究所では在宅勤務を実施しておりますので、メールにてお問い合わせ願います。

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail : ex-press[at]riken.jp

筑波大学 広報局

TEL : 029-853-2040 FAX : 029-853-2014

E-mail : kohositu[at]un.tsukuba.ac.jp

埼玉大学 総務部広報渉外課広報係

TEL : 048-858-3932 FAX : 048-858-9057

E-mail : koho[at]gr.saitama-u.ac.jp



---

東京大学 大学院理学系研究科・理学部 広報室  
E-mail : kouhou.s[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。

---