

元素起源の謎解明に向けた超高速質量測定法の実現

ナイミ・サラ
Naimi Sarah

リ・ホンフー
Li Hongfu

山口 由高
Yamaguchi Yoshitaka

上坂 友洋
Uesaka Tomohiro

1. 重い元素の起源と原子核の質量

本稿の読者の皆さんで自身の体重を100万分の1の精度で知っている方はいるだろうか？標準的な体重を60 kg とするとその100万分の1は60 μg であり、その精度で測れる体重計すら見つけることが難しいであろう。一方、物理学の研究では、粒子1個の重さを100万分の1の精度で決める必要が生じることが往々にしてある。

鉄より重い元素の起源を探る研究がその好例である。我々の身体や世界を形作る元素は、宇宙開闢のときから存在したわけではない。ビッグバン直後に存在した元素は、水素とヘリウム及びごく少量のリチウムとベリリウムだけだったと考えられている。その後水素やヘリウム等は、時には広大な宇宙空間を漂い、時には恒星の一部となってその巨大な重力の中でゆっくりと融合し重い元素へと姿を変えてきた、というのがよく知られている元素合成のシナリオである。しかし、このシナリオで作られるのは鉄やニッケルまでなのである。鉄 (^{56}Fe) やニッケル (^{58}Ni) は数ある原子核の中で最も安定であり、これより重い原子核を作るには、恒星中の熱エネルギー程度では全く足りないため、上のシナリオで作られることはない。

では、鉄より重い元素は、どこでどのようにして作られたのか？1950年代、ウィリアム・ファウラー博士らが鉄より重い元素がどのように作られるかについて、2つの理論仮説、つまり元素合成シナリオを提示した^{1,2)}。「遅い中性子捕獲過程 (s 過程)」と呼ばれるシナリオと、本稿の主テーマである「速い

中性子捕獲過程 (r 過程)」と呼ばれるシナリオである。図1に示すように、いずれの過程も辺りを飛び回っている中性子を原子核が捕獲することにより重くなり、途中原子番号を1つ増やす β^- 崩壊を繰り返して重く、原子番号の大きい元素を生成していく。s 過程が赤色巨星の中で起こり、この過程により鉛やバリウム等重元素の約半分が作られたことは比較的良く分かっている。一方で、我々の生活で重要な役割を担う金やウラン、希土類元素を作る r 過程についてはごく最近まで理論仮説の域を出なかったと言って良い。

r 過程の何がそんなに難しいのだろうか？ここでは「速い」という言葉に着目して解説してみたい。対比のため、s 過程は数千年の時間をかけて鉄から鉛に渡る元素を生成することを先に述べておく。では、r 過程はどの程度速いのか？驚くべきことに r 過程はたかだか数秒の短時間で鉄からウランまでの元素を作り上げてしまうのである。そのためには、

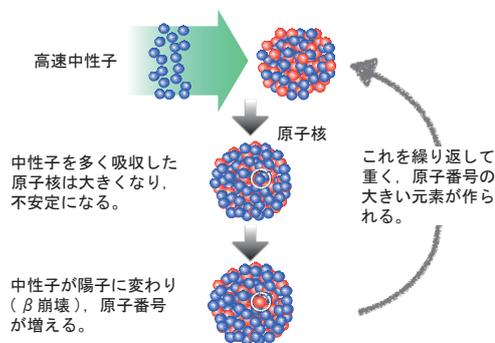


図1 重元素合成の概略図

中性子捕獲による原子核質量の増大、 β^- 崩壊による原子番号の増大を繰り返して、より重い元素が作られていく

尋常ではない量の中性子流と、1秒をはるかに下回る寿命で β^- 崩壊を起こす原子核を経由することの2つが必要となる。

現在宇宙物理学者と原子核物理学者は、大量の中性子流が存在する場として、重力崩壊型超新星爆発と、2017年に重力波で初観測された中性子星合体³⁾が有力候補だと考えている。両者には温度、密度、中性子流等の条件に違いはあるものの、非常に短い時間に多くの高速中性子流を生じる点で共通点があり、原子核が極めて高いレートで中性子を捕獲する環境が整っている。

では1秒をはるかに下回る寿命で β^- 崩壊を起こす原子核はどのようなものなのか？それは、安定な原子核よりも格段に中性子数の大きい超中性子過剰核である。原子核は中性子数が増える毎に、 β^- 崩壊寿命が急激に短くなる。今回の研究に関わるパラジウム同位体（原子番号47番）で言えば、安定線にほど近いパラジウム113では半減期が93秒もある一方、 r 過程元素合成に関わるパラジウム123より中性子過剰な場合にはその半減期は1秒を大きく下回る。これらの超中性子過剰核は、安定な原子核が大量の中性子を捕獲して作られると考えれば、 r 過程で想定している大量の中性子流が存在する環境でこれらの超中性子過剰核が生成され、その速い β^- 崩壊によって原子番号の大きな元素が次々と作られるという想定もうなずける事であろう。

ファウラー博士らによる r 過程仮説の提唱以来、これに関わる超中性子過剰核の実験研究は原子核物理学者の夢であったが、その生成の困難さから地球上で作ることができなかった。その実現は2007年に稼働を開始した理化学研究所RIビームファクトリー（RIBF）を待つこととなる。RIBFは、光速の70%まで加速したウラン原子核の分裂によって r 過程に関わる原子核を実験室で大量生成することができる現在世界で唯一の重イオン加速器施設である。実際、これまで中性子過剰核の寿命測定⁴⁾や中性子放出率測定⁵⁾で r 過程の理解を進展させる重要な成果を上げてきた。

さて、ここから本稿の主役である質量の出番である。 r 過程の中で生成される原子核は、より中性子を捕獲して質量を増やすか、それとも逆に光(γ 線)を吸収して中性子を放出し質量を減らすか、さもなければ β^- 崩壊して原子番号を増やすかの決断にい



図2 RIビームファクトリー施設に建設された稀少RIリング
赤色の双極電磁石24台により構成されている

つも迫られている。質量はこの決断の根拠となる物理量なのである。中性子捕獲、中性子放出、 β^- 崩壊いずれにおいても、反応前後の質量差によってその起こり易さが大きく変わるため、質量差が r 過程がどの原子核を経由するか、その経路を決定づけるのである。実際、元素合成理論の著名な研究者であるコーワン、ティールマン、トルーマンは、1991年に発表した r 過程に関するレビュー論文で「原子核の質量は、おそらく r 過程の動作に最も決定的な影響を与える」と書いている⁶⁾。

2. 超高速質量測定法

r 過程の経路に関する情報を得るには、原子核のエネルギー典型的準位間隔である0.1–1 MeVより良い精度で質量を決める必要がある。大まかに言って質量数100の原子核の重さは10万 MeVなので、0.1 MeVは、10万分の1の精度に対応する。過去、ペニングトラップ法や重イオン蓄積リングを用いたショットキー質量測定法等、原子核の質量を10万分の1より良い精度で測定できる手法はよく知られていた。これらの手法を r 過程原子核に適用すれば、 r 過程研究に必要な質量データが手に入る!? そうは問屋が卸さないのである。これらの従来手法では、質量測定に数秒の時間をかける必要があり、半減期が1秒を大きく下回る超中性子過剰核を適用すると測定の途中で崩壊してしまい測定にならないのである。

そこで、今回確立した超高速質量測定法の出番である。この新しい手法では、RIBFに新たに建設された稀少RIリング（図2）を用いて、「等時性質量

測定」と「個別入射」の2つを組合せ、従来技術では到底不可能だった時間的にランダムに飛来する不安定核ビームに対して1ミリ秒以下の原子核質量測定を可能にしたのである⁷⁾。

等時性質質量測定は、蓄積リングを用いた質量測定法の1つである。蓄積リングを用いた質量測定のエッセンスを粗っぽく言うと、運動量が分かった粒子を蓄積リングで周回させてその速度を測定し、運動量と速度から質量を決定する手法である。大変シンプルな原理で良いのだが、そのまま適用すると運動量の決定精度が悪いことがボトルネックになってしまう。稀少RIリングの優れた特長は、周回周期が運動量によらないサイクロトロン型の構造を採用することで、ショットキー質量測定法では必須のビーム冷却を排除したことにある。数秒以上かかるビーム冷却を不要としたことで、1ミリ秒以下の質量測定を可能としたのだ。稀少RIリングは、24台の双極電磁石よりなる世界で最初のサイクロトロン型重イオン蓄積リングであり、まさに歴史上9台のサイクロトロンを作り続けてきた理研仁科研・仁科センターの伝統を活かした技術の結晶である。このリングでは、トリムコイルと呼ばれる磁場の微調整用コイルを偏向電磁石に備え、受入可能なエネルギー範囲 ($\Delta E/E \sim 2\%$) で ppm オーダーの等時性環境を実現することができる。

今回の質量測定実現に至る最大のハードルは、時間構造を持たない不安定核ビームをいかに蓄積リングに入射させるか、という難題の解決であった。蓄積リングはパルス状の時間構造を持ったビームしか受け付けられない、というのが常識であった。そこ

でこれまでの蓄積リングは、シンクロトロンのようにパルスビームを供給する加速器と組合せて用いられていた。稀少RIリングの場合、入射できる時間ウィンドウは0.1マイクロ秒程度であり、頑張って入射の繰り返し率を100 Hzに上げて、入射効率は10万分の1にしかならない。これがかつてサイクロトロン加速器の施設には蓄積リングが建設されなかった理由である。RIBFのようにサイクロトロンを用いて世界最高強度の不安定核ビームを生成する施設で蓄積リングという優れた装置を用いることができないのは、全く歯がゆいことであった。

仁科センターの研究者にこの困難を打開するひらめきが訪れたのは2000年代初めのことであった。重元素の起源研究で対象となる1時間に数個程度しか生成されない超稀少不安定核の場合には、仮にそれがランダムに飛来したとしても、そのタイミングを事前に分かることができれば高効率で蓄積リングに入射できることに気付いたのである。これが今回実現した「個別入射」である。

図3を用いて個別入射の実際について説明してみよう。ポイントは、粒子が自身で生成した信号を用いて稀少RIリングの入射ウィンドウを開き、そこに滑り込めるか否かである。40歳代以上の読者であれば、かつてSASUKEというテレビ番組で行われていた、競技者がボタンを押し、落ちてくるボールを受け止める競技を思い出してくれば雰囲気は伝わるだろう。

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) 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

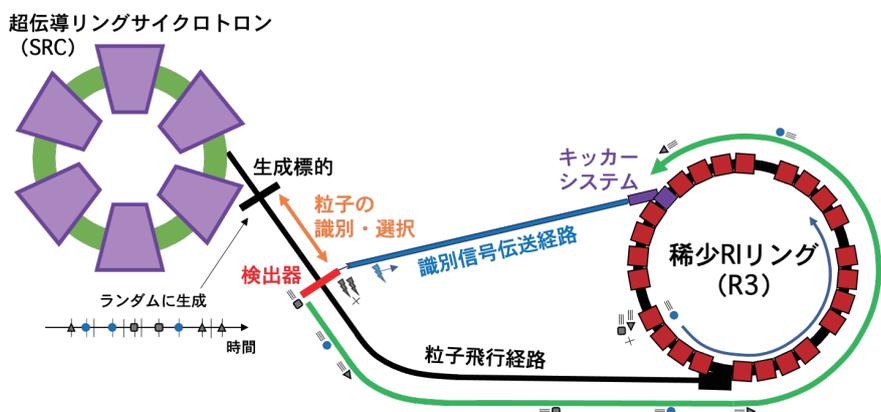


図3 稀少RIリングへの個別入射の概念図
詳しい説明は本文を参照

む大量の同位体がランダムに生成される。この時点では時間的にほぼ連続的に粒子が飛来している。次に超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS の前段部分を用いた事前選択と、生成標的の約 30 m 下流に置かれた検出器を用いた粒子識別を組合せ、到達した粒子が研究対象粒子かどうかを識別する。この時点で粒子の飛来数は 1 秒間に 1 個程度にまで抑えられると同時に、「欲しい粒子が来た」という信号を生成することができる。

この時点でゴールである稀少 RI リングの入射ポイントまでの飛行経路は約 160 m。粒子は光速の 55% の速度で飛行し、約 1 マイクロ秒 (μs , $1 \mu\text{s}$ は 1000 分の 1 ミリ秒) 後に稀少 RI リングに到達する。一方、入射ウィンドウを開くための信号は、青色で示した光速の 95% で伝送できる同軸管を用いて、稀少 RI リングまで送られる。最大限の近道をしてかかる時間は 0.5 マイクロ秒。残る 0.5 マイクロ秒以下で動作する粒子入射システム (キッカーシステム) を建設できたのが、今回の成功に繋がった。この個別入射法の成功がもたらすものは、稀少 RI リングへの応用のみに留まらず、これまでシンクロトロン施設でのみ可能であった蓄積リング実験を、サイクロトロン施設に展開する道を開くのである。

3. パラジウム 123 (^{123}Pd) の質量測定

今回の研究では、166 個の ^{123}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た。 ^{123}Pd は r 過程の「第 2 ピーク」と呼ばれる構造を構成する原子核の 1 つであると共に、その半減期は 108 ミリ秒であるため明らかに従来型の質量測定では測ることのできない原子核である。

得られた ^{123}Pd 核の質量が重元素合成に与える影響を、米国ロスアラモス国立研究所の天体物理学研究者と共同で調べた。元素合成シミュレーションに今回の新しい質量データを入力し、原子核が中性子を捕える確率や β 崩壊後の中性子を放出する確率等、r 過程を支配する量に対する ^{123}Pd 核質量の影響を定量化した。その結果、質量数 122 の元素 (スズ -122, ^{122}Sn) が質量数 123 (スズ -123, ^{123}Sn) の元素に比べて過剰に生成されるという、**図 4** に示される太陽系で観測されている組成は、新しい質量値を

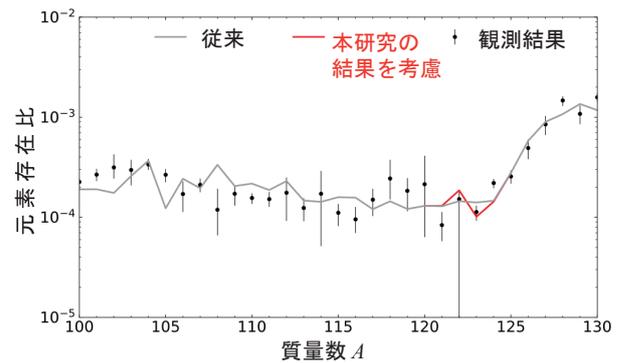


図 4 太陽系で観測されている元素存在比を質量数 100~130 に対して示したもの

黒丸が元素存在比の観測結果。質量数 123 での減少は本研究の結果を考慮したシミュレーションにより初めて再現される

用いて初めて再現できるという結論に到達することができたのである。

4. 展望

今回の結果は、稀少 RI リングを用いた超高速質量測定法が短寿命な r 過程核の研究に極めて有効であることを示した。また、稀少同位体である ^{123}Pd のたった 1 つの質量データが、宇宙における重元素合成の新しい側面を明らかにするものであり、理解を進めるものであることも教えてくれた。r 過程に関与する原子核は数百種類を大きく越え、その多くは新たな測定を待っている。今後稀少 RI リングを用いた超高速質量測定法を活用し、r 過程の本質に迫る研究を展開していきたいと考えている。

参考文献

- 1) E.M. Burbidge, *et al.*, *Review of Modern Physics*, **29**, 547 (1957)
- 2) 田中雅臣, *Isotope News*, **758**,7-11 (2018)
- 3) B.P. Abbott, *et al.*, *Physical Review Letters*, **119**, 161101 (2017)
- 4) J. Wu, *et al.*, *Physical Review Letters*, **118**, 072701 (2017)
- 5) V.H. Phong, *et al.*, *Physical Review Letters*, **129**, 172701 (2022)
- 6) J.J. Cowan, *et al.*, *Physics Reports*, **208**, 267 (1991)
- 7) H.F. Li, *et al.*, *Physical Review Letters*, **128**, 152701 (2022)

(理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)