科学研究費助成事業（基盤研究（Ｓ））公表用資料
〔令和４(2022)年度 中間評価用〕

令和４年３月３１日現在

研　　究　　期　　間：２０２０年度～２０２４年度
課　　題　　番　　号：２０H０５６４８
研　究　課　題　名：中性子過剰核の変形から探る爆発的重元素合成

研究代表者氏名（ローマ字）：西村　俊二（NISHIMURA Shunji）
所属研究機関・部局・職：理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・先任研究員
研　究　者　番　号：９０２７２１３７

研究の概要：
本研究は、ランタノイド元素起源とされる「変形起因説」と「アクチノイド非対称核分裂説」の検証を行う。理研・RIBF 施設を利用し爆発的重元素合成の鍵を握る中性子過剰核の崩壊と質量を測定する。機械学習を取り入れた原子核理論に実験データを投入し、原子核データベースを構築する。中性子星衝突、超新星爆発におけるｒ-プロセス元素合成計算を行い、金・白金を含めた重元素合成の研究を推進する。

研究分野：原子核実験

キーワード：重元素合成、β崩壊、質量、原子核理論、機械学習、連星中性子星衝突、超新星爆発

１．研究開始当初の背景

鉄より重い元素の約半分は高速中性子捕獲とβ崩壊が競合する爆発的元素合成・ｒ-プロセスが起源とされ、超新星爆発と連星中性子星衝突が有力な候補に挙がっている。重力波と電磁波の同時観測により、連星中性子星衝突(GW170817)のサイトから放出された電磁波放射現象・キロノバの詳細な解析が始まった。ランタノイド元素合成の証拠とされる近赤外光が観測され話題となった。太陽系の元素組成比において r-プロセスで生成されたランタノイド成分は、質量数 $A = 165$ 近傍に特徴的なピーク構造をもつ（図１）。しかし、そのピークが形成されるメカニズムは謎に包まれている。ランタノイド含有量は、ｒ-プロセス強度の電子比(Ye)に大きく依存するため、定量的な重元素生成量の見積もりが重要となる。中性子過剰核の崩壊速度、遅発中性子放出、質量の情報が必要となるが、実験データの不足と原子核理論の不確定性が大きく、定量的な評価ができていない。

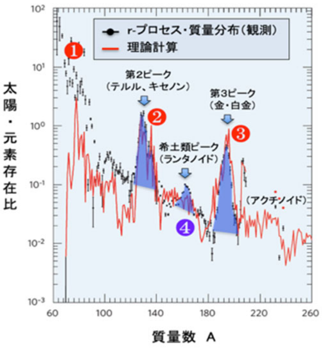

図 １：太陽系 r-プロセス成分

２．研究の目的

本研究は、ｒ-プロセスで重要となる中性子魔法数に加え、原子核の変形に焦点を当てた重元素合成の起源の解明に関する研究を行う。現状では、非常に中性子過剰な原子核の基本的性質の情報が絶対的に不足している。様々な原子核理論を採用した評価が行われている。しかし、r-プロセスに影響を与える中性子過剰核の半減期、質量などは不確定性を大きく含む理論に依存している。そこで、理研 RIBF 加速器施設を利用し、質量数 $A = 70$～220 までの数百種もの中性子過剰核の崩壊速度、遅発中性子放出、質量、励起状態、魔法数に関する基礎データを測定する。得られた数百種もの実験データと原子核理論の比較を行い、実験的に生成出来ない未知の中性子過剰核の基礎データの精度と不確定性を向上するためにニューラル・深層学習を組み合わせた解析手法を導入する。最終的に、構築した大規模な原子核データベースを r-プロセス計算に取り込み、希土類元素合成を含む重元素起源の解明を目指す。

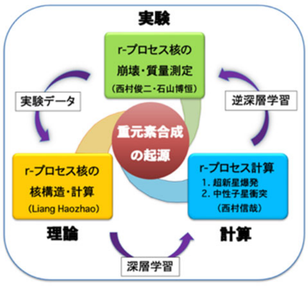

図 ２：研究体制

３．研究の方法

理化学研究所・RIBF 加速器において ^{238}U ビームの破砕反応を利用し、非常に中性子過剰な原子核(RI)を生成する。崩壊測定：生成した RI は、高検出効率のβ線検出器に埋め込み、大規模な原子核データ収集プロジェクトを推進する。β崩壊検出器（WAS3ABi 検出器、CAITEN 検出器）に加え、中性子検出器（^{3}He プロポーショナル検出器、飛行時間型中性子検出器）、γ線検出器（Ge 検出器、LaBr3(Ce)検出器、 LBC 検出器、NaI(Tl)検出器）を組み合わせた国際的崩壊測定実験（BRIKEN、CAITEN、IDATEN、DTAS、Ge ボール）を行う。大強度ビームに対応させた高速読み出し用デジタイザーを導入し、様々な検出器の性能を最大限引き出すための波形解析型データ収集システムを構築する。質量測定：ガス捕獲システムと反射型質量分析装置を組み合わせた高精度質量測定プロジェクト ZD-MRTOF を実施する。本研究では、中性子過剰なランタノイド（中性子数 $N = 104$ 近傍）に着目し、r-プロセス元素分布に存在する希土類元素ピークの起源と考えられているβ崩壊、中性子分離エネルギーS_{2n}異常の探索を行う。原子核理論：得られた数百種以上の中性子過剰核の崩壊と質量のデー

タを収集し、理論値との相関を調べる。原子核理論との比較に加え、ニュラルネットワーク・深層学習法を導入した計算を行い、β崩壊、質量の系統性と異常性の探索を行う。ｒ-プロセス計算：実験と理論の協力により構築した大規模な原子核データベースを取り込んだ最新のｒ-プロセス重元素合成の計算を行う。最終的に、原子核実験、理論、重元素合成計算の連携を図り、原子核変形効果に着目したランタノイド元素合成の検証、さらに中性子魔法数、金・白金を含めた総合的な重元素合成の理解を目指す。

４．これまでの成果

崩壊測定：中性子魔法数 N = 126 を超える非常に中性子過剰な原子核の崩壊測定実験を実施した。RIBF 加速器施設では原子番号 Z > 75 を超える中性子過剰核の識別が出来ていなかった。そこで、高エネルギー分解能のシリコン・テレスコープを開発・導入した。2021 年、ウランビームの破砕反応を利用した崩壊測定を実施し、多くの崩壊データを収集することに成功した。中性子魔法数　N = 50,　82, 126、さらに希土類領域における数百種もの中性子過剰核の半減期に加え、遅発中性子放出に関する崩壊データの収集に成功した。質量測定：中性子過剰核を効率的に捕獲し精密な質量測定を実現する ZD−MRTOF プロジェクトを開始した。測定装置の調整を行うためにパラサイト実験を実施した結果７０種以上もの中性子過剰な原子核の質量測定に成功した。その内、８種は初めての質量データとなった。2021 年末から本実験を開始し、すでに ^{74,75}Ni の質量を高精度で測定することに成功した（代表：Rosenbusch 氏）。希土類元素合成の謎を探るために中性子数 N = 104 近傍の質量測定実験を提案し、承認された（代表：西村）。原子核理論：得られた遅発中性子放出確率 P_{1n} を利用し、機械学習に取り込んだ理論計算に取り込むデモンストレーションを行った。中性子魔法数 N = 82 上の原子核の崩壊データの計算精度が改善されることを確認した。ｒ-プロセス計算：ｒ-プロセス・第２ピークの形成に寄与する中性子過剰核の崩壊について解析した結果、２個の遅発中性子を放出する現象をいくつも見つけた。最新の崩壊データを取り込んだ重元素合成の計算を実施した結果、連星中性子星衝突環境下において、得られた遅発中性子放出データは Te, Cs, Ba の生成量に大きな影響を与え、ｒ-プロセスのエントロピーと爆発速度に大きく依存することが明らかになりつつある。

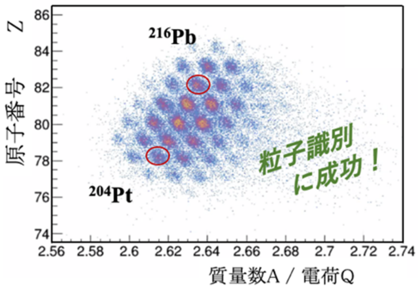

図 ３：N=126 領域の崩壊測定実験

５．今後の計画

崩壊測定：これまでに収集した大量の崩壊データ（質量数 A = 70 ~ 220）の解析を行い、数百種もの中性子過剰核の遅発中性子放出確率(P_{1n},P_{2n},$P_{3n...}$)を決定する。r-プロセスのフリーズアウト時に放出された遅発中性子との再結合反応(n, γ)の影響を考慮した計算を行う。高性能β線検出器・WAS3ABi 検出器の開発に加え、高時間分解能を特徴とするβ線検出器 CAITEN と高検出効率飛行時間中性子検出器を導入した遅発中性子のエネルギー測定を開始する。さらに、高時間分解能を特徴とする $LaBr_3$(Ce)検出器、全ガンマ線吸収型検出器 DTAS（スペイン）を導入したガンマ線測定プロジェクトを開始する。質量測定：中性子魔法数 N = 50 の ^{78}Ni 領域（Rosenbusch 氏）、N = 126 領域(和田氏)の中性子過剰核の質量測定に加え、希土類領域の変形に着目した質量測定（西村）の準備・実施を行う。質量分析装置に新たなβ線検出器を導入し、核異性体の崩壊測定実験を実施する。原子核理論・元素合成計算：原子核理論に最新の原子核データとニューラルネットワーク・機械学習の導入を組み合わせて、原子核データベースの構築を完了させる。原子核データを取り込んだ総合的な r-プロセスの計算を行い評価する。

６．これまでの発表論文等（受賞等も含む）

［1］ “The new MRTOF spectrograph for nuclear masses following RIBF’s ZeroDegree spectrometer, featuring new methodologies for ion selection and mirror optimizaion” ,
M. Rosenbusch, M. Wada, ..., <u>H. Ishiyama</u>, ..., <u>S. Nishimura</u> et al., arxiv:2110.11507 (2021).

［2］“New constraints on the neutron-star mass and radius relation from terrestrial nuclear experiments”,
*H. Sotani, <u>N. Nishimura</u>, T. Naito, PTEP (2022), in press (arXiv:2203.05410)

[3] “β-delayed one-neutron emission probabilities within a neural network model”,
Di Wu, C.L.Bai, H.Sagawa, <u>S.Nishimura</u>, and H.Q.Zhang, Phys. Rev. C **104**, 054303 (2021).

[4] “Tensor-force effects on shell-structure evolution in N = 82 isotopes and Z = 50 isotopes in the relativistic Hartree-Fock theory”,
Zhiheing Wang, Tomoya Naito, and <u>Haozhao Liang</u>, Phys. Rev. C **103**, 064326 (2021).

7．ホームページ等

http://ribf.riken.jp/~nishimu/