

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800117

研究課題名(和文) 中性子過剰Zr同位体の形状と崩壊半減期の関係

研究課題名(英文) Relation between nuclear shape and beta-decay half life of neutron-rich Zr isotopes

研究代表者

炭竈 聡之 (Sumikama, Toshiyuki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・チームリーダー

研究者番号：20392003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽系の鉄より重い元素の主な起源は、超新星爆発のような大量に中性子が存在する環境下での元素合成とされている。その途中では、短時間で中性子捕獲と崩壊による陽子数増加を繰り返しながら非常に中性子が過剰な原子核が作られている。この研究では中性子過剰核のうち陽子数40(Zr)周辺の崩壊の直接測定を行い、崩壊半減期と関連する原子核の変形を調べた。Zr同位体の励起状態の寿命を決定し変形度の導出に成功し、中性子数64で最も多く変形していることが示された。Mo同位体の回転状態を示す励起状態を新たに発見し変形の詳細について情報を得た。

研究成果の概要(英文)：The origin of elements heavier than iron in the solar system is considered to the nucleosynthesis in an environment where many neutrons exist such as a supernova explosion. In this process, very neutron-rich nuclei are produced via continuous neutron-capture reactions and beta decays. In this study, the beta decays were measured for the neutron-rich nuclei with the proton number 40 (Zr) and neighboring. The shape of nuclei, which is related to the beta decay half lives, was investigated. The deformation parameters for the Zr isotopes were successfully determined from the life time of the excited state, and the maximum deformation at the neutron number 64 was determined. New rotational bands in Mo isotopes were also observed, which are related to the detail of the deformed shape.

研究分野：原子核物理

キーワード：崩壊 重元素合成

### 1. 研究開始当初の背景

中性子の急速な捕獲と崩壊を短時間で繰り返す元素合成過程(r過程)は、太陽系の鉄より重い元素の主要な合成過程と考えられているが、未だ太陽系の組成比を理解するまでには至っていない。r過程に参与した中性子が非常に多い中性子過剰な原子核の性質を調べようにも、近年までその生成自身困難であった事も一因である。

2009年、理研RIBF施設において理論的に予測困難であった陽子数40(Zr同位体)周辺中性子過剰核に着目し、それらの崩壊測定を我々が世界で初めて成功させた。その結果、崩壊半減期は予想より短い原子核が見つかった。また、核構造を調べるため遅延線測定も行い原子核の励起準位を決めることができた。しかしながら、励起準位については収量の多かった一部の原子核に限られていたため、詳細な実験的研究により核構造の陽子数・中性子数依存性を調べる必要であった。

### 2. 研究の目的

中性子過剰Zr同位体及びその周辺同位体の形状は大きく変形していることがわかっている。特に、Zr同位体は中性子数が56, 58では球形であるのに対し、60になると大きく変形することが知られていて、さらに中性子過剰な原子核の形状変化に着目している。r過程に参与したと考えられているのは中性子数70周辺の変形した中性子過剰核である。中性子数に対しては変形度が緩やかに変化する一方、陽子数の変化に対しては3軸非対称な変形のしやすさが異なっているという理論予測がある。

陽子数や中性子数による変形の形状変化を調べるため高統計の崩壊測定を行い特にZr同位体とMo同位体の違いを明らかにし、半減期との関連を調べるのが目的である。

### 3. 研究の方法

中性子過剰核は、理研RIBF施設で345MeV/uに加速された $^{238}\text{U}$ ビームの飛行核分裂反応によって作られた。今測定では、図1のGeクラスター検出器群(EURICA)を用いることで線の検出効率を前回(2009年)実験の7倍に改善させた。

偶々核の変形度は、第1・ $2^+$ 状態の寿命から導出できる。高速タイミング測定用の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器18台(図2)を導入し、寿命も測定できるようにした。

中性子過剰核を停止させる両面ストリップ型Si検出器(図3)のストリップ幅を約3mmから1mmへと細かくし位置検出精度を向上させた。線タイミング測定用プラスチックシンチレーション検出器も設置し、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ と組み合わせた線と線の時間分解能を向上させた。

中性子過剰核ビームは同時に複数種類生成され、1粒子毎に陽子数と質量数の識別が

可能となっている。それを両面ストリップ型Si検出器の異なる位置へと停止させ線の位置も同定することで、どの原子核が崩壊したか分かるようになっている。崩壊の検出効率を向上させつつバックグラウンドの減少を目指し、停止位置及び線放出位置の検出アルゴリズムを新たに開発した。

遅延線エネルギースペクトルを導出しZr及びMo同位体(偶々核)の励起状態を導出し、Zrの $2^+$ の寿命を決定、変形度を導出した。

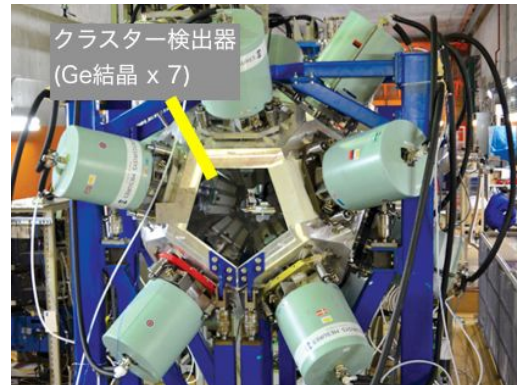


図1: EURICA セットアップ。線測定用のGe結晶7つを1セットとしてパッケージされたクラスター検出器(欧州のGamma poolグループ所有)を12台使用した。



図2: 高速タイミングアレイ( $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器群、イギリスブライトン大、サリー大所有)。励起状態の寿命測定用。約1nsecの寿命測定に最適である。左右に見えるクラスター検出器に挟まれているのが $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器である。



図3：WAS3ABi セットアップ。プラスチックシンチレーション検出器2台の内側に両面ストリップ型シリコン検出器(60x40x1mm<sup>3</sup>)5枚がある。中性子過剰核ビームをシリコン検出器内に止める。

#### 4. 研究成果

まず、中性子過剰核の停止位置導出法の改善を行った。シリコン検出器は5枚スタックされている。シリコン検出器の時間スペクトルの相関(図4)から、停止したシリコン検出器より下流にも1 $\mu$ sec遅れて信号が生じていることがわかった。これは、停止した際に発生する信号が非常に大きいため、その下流のシリコン検出器に誘起信号が出てしまうためである。この誘起信号も使って停止位置を決めるプログラムを作成し、停止位置の決定精度を向上させた。この成果は、5. [雑誌論文]の<sup>2</sup>に出版し、5. [学会発表]の<sup>9</sup>で発表した。

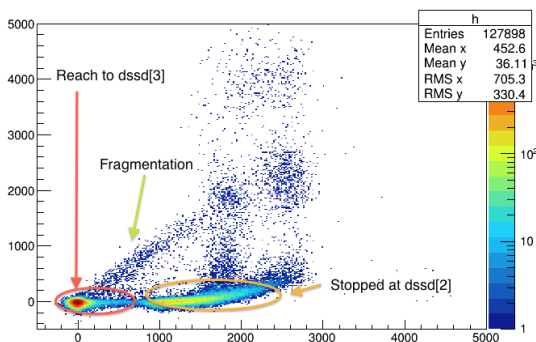


図4：3枚目(縦軸:dssd[2])と4枚目(横軸:dssd[3])のシリコン検出器で観測された時間スペクトルの相関。単位はnsec。3枚目で止まった場合、4枚目に約1 $\mu$ sec遅れて誘導信号が現れている。上流側の物質と核反応し発生した軽い粒子(Fragmentationと書いている部分)が検出器を突き抜けているケースも観測されている。

次に線の放出位置決定法の改善を行った。崩壊に伴い放出された線は、ほとんどの場合1mm厚のシリコン検出器では止まらない。従来の解析では検出された場所全てを崩壊した位置の候補としていたため、バックグラウンドを増やす要因となっていた。

線の進行方向によっては、複数ストリップにまたがって通過する場合もある。これらのケースも考慮しながらエネルギー較正した結果、X面とY面の測定エネルギーの差は、20keV(1%)程度の値を達成した。線の後方散乱や遅延線の検出により1枚のシリコン検出器に複数箇所放射線が当たっている例があった。例えば、2点に放射線が当たった場合、X面とY面共に2ストリップで信号が検出される。ヒットパターンだけでは、4点の候補があるため、エネルギー損失を元に当たった位置2点を選ぶ事に成功した。このようにシリコン検出器でのX,Y位置をレイヤー毎に出し、線放出位置を限定することができた。5. [学会発表]の<sup>5</sup>で発表した。

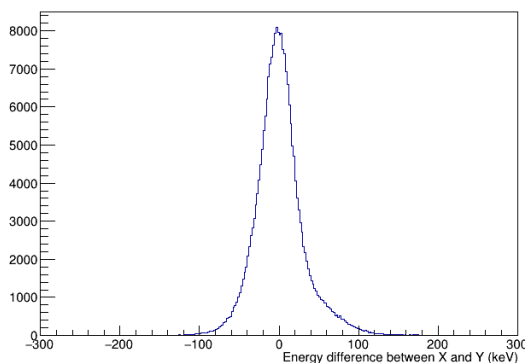


図5：X面とY面で検出されたエネルギーの差。分布の幅は、20keV(1%)を達成した。

LaBr<sub>3</sub>(Ce)結晶で、<sup>104</sup>Zr, <sup>106</sup>Zrの2<sub>1</sub><sup>+</sup>から基底状態への脱励起線の測定に成功した。寿命をそれぞれ、2.90(+25/-20) ns, 2.60(+20/-15)nsと決めることができた。換算遷移行列要素B(E2)は、0.39(2) e<sup>2</sup>b<sup>2</sup>, 0.31(1) e<sup>2</sup>b<sup>2</sup>となり、変形度 $\beta_2$ は、0.39(1), 0.36(1)となった。その結果、中性子数64で変形度が最大となっていることがわかった。これは、前回の実験で得られたエネルギーから推論していた結論の実験的検証である。Zr同位体のB(E2)の理論計算は、実験値と同様大きな変形に対応する値となっている。しかしながら、中性子数64での変形最大化を再現している計算は未だ無い。この成果は、5. [雑誌論文]の<sup>1</sup>に出版し、5. [学会発表]の<sup>3, 4, 6</sup>で発表した。

Mo同位体(質量数106, 108, 110, 112, 114)への崩壊を解析し、新しい線のピークを主に110, 112, 114の結果から得た。特に110, 112については、高いスピンの状態まで回転バンドが複数観測されていて、3軸非対称方向への振動運動に対応する回転バンド(バンド)も観測した。近年の理論研究の発展により励起エネルギーが予測できるようになっていて、形状について詳細な議論が期待される。このプレリミナリーな結果は、5. [学会発表]の<sup>1, 2</sup>で発表した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 26 件)

- 1 F. Browne, A.M. Bruce, T. Sumikama et al.(47 人中 3 番目)、Lifetime measurements of the first  $2+$  states in  $^{104,106}\text{Zr}$ : Evolution of ground-state deformations、Physics Letters B、査読有、750 巻、2015、448-452、  
DOI:10.1016/j.physletb.2015.09.043
- 2 I. Nishizuka, T. Sumikama, et al., (47 人中 2 番目)、Decay Half-lives of  $A \sim 110$  Nuclei on the r-process Path, JPS Conf. Proc.、査読有、6 巻、2015、030062/1-4、  
DOI: 10.7566/JPSCP.6.030062
- 3 F. Browne, A. M. Bruce, T. Sumikama 他(47 人中 3 番目)、Half-Life Measurements of  $2_1^+$  States in the Vicinity of  $^{108}\text{Zr}$  and their Implications for Ground-State Deformations JPS Conf. Proc.、査読有、6 巻、2015、030012/1-5、  
DOI: 10.7566/JPSCP.6.030012

[学会発表](計 12 件)

- 1 炭竈聡之、中性子過剰 Mo 同位体の崩壊核分光、日本物理学会第 72 回年次大会、2017/3/17-20、大阪大学(大阪府・豊中市)
- 2 Jeongsu Ha, EURICA Experiments at RIKEN: Shape transitions of Neutron-rich Zr-Mo Isotopes, KPS 2016 Fall Meeting, 2016/10/19-21, Gwangju (韓国).
- 3 炭竈聡之、Isomer search for even-even nuclei in the vicinity of  $^{108}\text{Zr}$ , International Nuclear Physics Conference (INPC2016), 2016/9/11-16, アデレード(オーストラリア)
- 4 炭竈聡之、Decay Spectroscopy around  $^{110}\text{Zr}$ , EURICA Collaboration Meeting, 2016/9/6-7, 理研(埼玉県・和光市)
- 5 Jeongsu Ha, Improvement of beta-ion position association in implantation detector WAS3Abi and beta-gamma spectroscopy of neutron-rich Mo isotopes, EURICA Collaboration Meeting, 2016/9/6-7,

理研(埼玉県・和光市).

- 6 炭竈聡之、Highlights of decay experiments at RIBF, NUSTAR Annual meeting 2016, 2016/2/26-3/4, Darmstadt (ドイツ).
- 7 西塚一平、 $\beta$ -decay half-lives of neutron-rich nuclei at  $A \sim 110$  on r-process path, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physics Society and The Physical Society of Japan, 2014/10/7-11, Waikoloa, Hawaii (USA).
- 8 炭竈聡之、Deformation Evolution of Neutron-rich Zr and Mo Isotopes around  $N = 68$ , Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 2014/6/1-6, 東京大学(東京都・文京区).
- 9 西塚一平、Beta Decay Half-lives in the  $A \sim 110$  region of R-process path, Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), 2014/6/1-6, 東京大学(東京都・文京区).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

炭竈 聡之 (SUMIKAMA, Toshiyuki)  
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・チームリーダー  
研究者番号：20392003