

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340065

研究課題名（和文） 中性子過剰核の寿命の系統的測定とその効率化

研究課題名（英文） Systematic Measurements of the Life of Neutron-Rich Nuclei and Improvement of its Data Acquisition

研究代表者

千葉 順成（CHIBA, Junsei）

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：50126124

研究成果の概要（和文）：理化学研究所の RIBF 加速器を用いて、質量数 $A=100-120$ の核種の $\beta\gamma$ 分光実験を行った。得られた大きな成果として以下の 2 つが挙げられる。（1）寿命はこれまでの理論予想よりも 2 倍程度短いことが分かり、元素合成プロセスの再検討を促している。（2）いくつかの核種で新たにアイソマーを含む励起状態を観測し、原子核の形状や構造に新しい知見をもたらした。また、データ収集システム、特にガンマ線測定のシステムを改善して効率を大幅に向上させることができた。

研究成果の概要（英文）： $\beta\gamma$ spectroscopy of the nuclei with mass number $A=100-120$ has been carried out at the RIBF accelerator (RIKEN). Among the results, the following two points should be emphasized; (1) The life of nuclei are about 2 times shorter than those obtained by theoretical models. This fact is urging reexamination of the nucleosynthesis scenario. (2) Some excitation states including isomers are first measured, and new knowledge was brought to nuclear shape and structure.

Electronics including data acquisition for gamma ray measurements have been improved which makes very efficient data acquisition possible.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2009 年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総 計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

科研費の細目表キーワード：原子核（実験）

キーワード：不安定核、加速器実験、ベータ崩壊、寿命測定、元素合成、データ収集

科研費の分科・細目：

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

地球上に存在する元素の起源は未だ完全に解明されていない。原子核中で最も安定な鉄

より重い元素の半分は、超新星爆発に伴う元素合成過程（r 過程）により作られたと考えられている。近年のさまざまな恒星の観測に

より宇宙初期から現在に至るまでの元素組成パターンの変化や r 過程の多様性などが明らかにされつつある。また、超新星爆発を再現するシミュレーションも活発に行われている状況である。原子核は超新星爆発に伴い大量に発生する中性子を捕獲しながら大きくなるが、具体的には主に次の2つの過程により元素合成が進行する。

- ・ 早い中性子捕獲反応(n, γ)がその逆反応(γ, n)と平衡を保つまで進行する。
- ・ ベータ崩壊により中性子は陽子に変換され、さらに中性子を捕獲する。

したがって、元素合成過程をシミュレーションにより再現するには、不安定核の β 崩壊半減期の情報が必要である。しかしながら、 r 過程に関与する非常に中性子過剰で不安定な原子核 (r 過程核) は人工的に生成することが困難であったため理論的予測に頼っていた。最近理化学研究所に建設された RI ビームファクトリー施設によってようやく r 過程核の生成が可能となり、 r 過程核の性質を実験的に測定し、理論予測を検証することができるようになった。

2. 研究の目的

最近理化学研究所に建設された RI ビームファクトリー施設によってようやく r 過程核の生成が可能となり、 r 過程核の性質を実験的に測定し、理論予測を検証することができるようになった。本研究では、 r 過程で重要な位置を占める中性子過剰核の β 崩壊を測定し β 崩壊半減期・崩壊経路を決定することで、元素合成過程を解明する事を目指す。

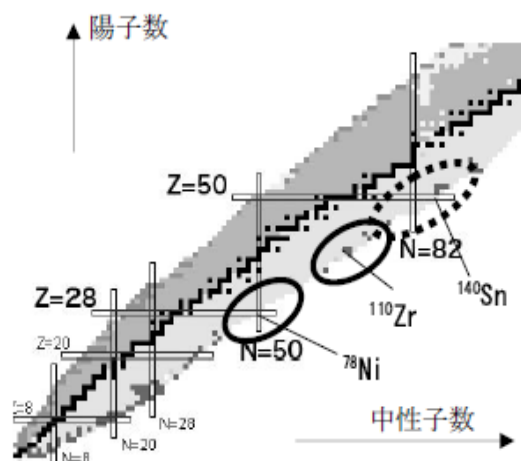


図1 核図表中での β 遅延 γ 線核分光実験の対象領域 (楕円)。縦横の線は魔法数。

図1の楕円部分の領域で β 遅延 γ 線核分光測定をする。具体的な領域は、 ^{78}Ni ($Z=28$,

$N=50$) 周辺の20種類、 ^{110}Zr ($Z=40, N=70$) 周辺の25種類、 ^{140}Sn ($Z=50, N=90$) 周辺の40種類である。これらの領域で、 β 崩壊半減期を測定し、理論予測の検証をする。また、核構造と半減期の関係を調べるため、遅延 γ 線測定から、励起状態のエネルギーを決め、不安定核の構造を明らかにする。

3. 研究の方法

理研 R I B F 施設のリングサイクロトロン加速器を用いて ^{78}Ni 、 ^{110}Zr 、 ^{140}Sn 周辺の β 遅延 γ 線($\beta \gamma$)核分光の測定を行う。測定は、以下の手順で行う。

- ・ 各原子核周辺の RI ビームをシリコン半導体検出器に止める。
- ・ シリコン検出器内で β 崩壊させ、同じシリコン検出器で β 線を検出する。
- ・ 埋め込みから崩壊までの時間差から半減期を導出する。
- ・ 遅延 γ 線を周囲に置いたクローバー型ゲルマニウム半導体検出器で測定する。

これらの手順の中で、RI ビームの新しい分離法の開発、 β 線検出効率向上を目指したシリコン検出器の読み出し回路の開発を行い、本研究期間で測定可能な核種を8倍にする。半減期および励起準位のエネルギーを決定し、理論予測を検証する。

4. 研究成果

研究目的で述べた3つの対象領域のうち、 ^{110}Zr の領域だけが実現したことを最初に述べておきたい。RIBF 装置の利用希望が多く、我々の実験時間が限定されてしまったためである。

ガンマ線測定の新しい回路とデータ収集系を開発整備したのち、2009年秋に理化学研究所(理研) RIBF 施設で実験を行った。この実験では、345 MeV まで加速した ^{238}U (ウラン) ビームを ^9Be (ベリリウム) に照射して、さまざまな中性子過剰な RI を作り出し、個々の RI の寿命や励起状態を測定した。後述の物理学上の成果はこの実験で得られたものである。2012年からは放射線医学総合研究所(放医研)でより軽い核に焦点をあてて実験を始めた。

以下に主な成果を2つ述べる。

(1) 中性子過剰核の寿命測定

クリプトンからテクニチウムまでの RI を発生させ、38個の中性子過剰な RI の寿命測定に成功した。そのうち18個は世界初のデータであった。質量数110近傍の中性子過剰核の寿命は理論予測の2~3倍も早いことが分かった。超新星爆発時の r 過程の経路上の RI に初めて実験的に踏み込んだ成果であり、こ

れまで謎となっていた理論予想の「重元素生成量の不足問題」へ解決の糸口を見いだしたことになる。この成果は 2011 年 2 月 1 日に理研でプレスリリースされた。

(2) ジルコニウム同位体での変形魔法数

ガンマ線測定により、ジルコニウム同位体の励起エネルギーを初めて測定した。モリブデン同位体との類似性から最大の変形度をもたらす変形魔法数が中性子数 64 に存在することを明らかにした。これは原子核の基本的性質や r 過程における元素合成の解明につながる成果と言える。この成果は 2011 年 5 月 9 日に理研でプレスリリースされた。

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 5 件)

① H. Watanabe, T. Sumikama, J. Chiba et al.; Development of axial asymmetry in the neutron-rich nucleus 110Mo
Physics Letters B704 査読有 (2011) 270-275

② T. Sumikama, J. Chiba et al.
Structural Evolution in the Neutron-Rich Nuclei 106Zr and 108Zr
Physical Review Letters 査読有 106 (2011) 202501

③ S. Nishimura, T. Sumikama, J. Chiba et al.; Beta-Decay Half-Lives of Very Neutron-Rich Kr to Tc Isotopes on the Boundary of the r-Process Path: An Indication of Fast r-Matter Flow
Physical Review Letters 査読有 106 (2011) 052502

④ H. Watanabe, T. Sumikama, J. Chiba et al.; Low-lying level structure of the neutron-rich nucleus Nb-109: A possible oblate-shape isomer
Physics Letters B696 査読有 (2011) 186-190

⑤ T. Ohnishi, T. Sumikama, J. Chiba et al.
Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a U-238 Beam at 345 MeV/nucleon
Journal of the Physical Society of Japan 査読有 79 (2010) 073201

〔学会発表〕(計 15 件)

① 西村太樹 HIMAC における 30S の超許容フ

エルミ型ベータ崩壊の研究

日本物理学会第 68 回年次大会 2013.03.27
東広島市

② 朱 易帆 30S の超許容フェルミ型ベータ崩壊の分岐比測定

日本物理学会第 68 回年次大会 2013.03.27
東広島市

③ 保高寿也 ベータ・ガンマ分光による 30S の分岐比測定の解析

日本物理学会第 68 回年次大会 2013.03.27
東広島市

④ T. Sumikama Decay spectroscopy of neutron-rich nuclei in the vicinity of 110Zr at RIBF

Zakopane Conference on Nuclear Physics 2012.08.27 ザコパネ (ポーランド)

⑤ T. Sumikama et al. 崩壊核分光法による中性子過剰 106, 108Zr の核構造研究

日本物理学会第 67 回年次大会 2012.03.26
関西学院 (日本)

⑥ K. Yoshinaga et al.. A DAQ system with 100MHz time stamp for the $\beta - \gamma$ spectroscopy experiments at RIBF

Advanced School and Workshop on Nuclear Physics Signal Processing2011 2011.11.21
カナニア (イタリア)

⑦ T. Sumikama et al. Search for spin-orbit-force reduction at 106, 108Zr around r-process path

Origin of Matter and Evolution of the Galaxies (OMEG11) 2011.11.15 RIKEN (日本)

⑧ T. Sumikama et al. Decay spectroscopy of neutron-rich Zr isotopes at RIBF

Symposium on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy (Gamma11) 2011.06.30 RIKEN (日本)

⑨ T. Sumikama et al. Beta-gamma spectroscopy of neutron-rich nuclei around 110Zr

Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS) 2011 2011.05.29 ルーベン (ベルギー)

⑩ T. Sumikama First decay spectroscopy at RIBF for neutron-rich nuclei in mass A = 110 region

JUSTIPEN - EFES Symposium on "Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei" 2010.11.11
会津

⑪ 吉永健太 β - γ 核分光法を用いた質量数 110 近傍の Zr 同位体の構造研究
日本物理学会 2010 年秋季大会 2010.09.13
九州工業大学

⑫ 吉永健太 β - γ 核分光実験における高収集効率 DAQ システムの構築
日本物理学会第 65 回年次大会 2010.3.23
岡山大学

⑬ 住田貴之 超重元素領域における核種同定のための電離箱の開発
日本物理学会 第 65 回年次大会 2010.3.20
岡山大学

⑭ 吉永健太 Performance test of detection system for beta-gamma spectroscopy at RIBF
3rd Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan 2009.10.14 ハワイ(米国)

⑮ 炭竈聡之 Energy focusing and RI-beam purification using two energy degraders at fragment separator BigRIPS
8th International Conference on Radioactive Nuclear Beams (RNB8)
2009.05.27 ミシガン(米国)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉順成 (CHIBA, Junsei)
東京理科大学理工学部・教授
研究者番号：50126124

(2) 研究分担者

炭竈聡之 (SUMIKAMA, Toshiyuki)
H23 年度まで東京理科大学理工学部・助教
研究者番号：20392003