

平成23年 5月 31日現在

機関番号： 82401

研究種目： 基盤研究(B)

研究期間： 2007~2010

課題番号： 19340074

研究課題名(和文)

元素合成に関わる中性子過剰核の β 崩壊の研究

研究課題名(英文) Beta-decay of very neutron-rich nuclei relevant to nucleosynthesis

研究代表者

西村 俊二 (NISHIMURA SHUNJI)

独立行政法人理化学研究所・櫻井R1物理研究室・前任研究員

研究者番号： 90272137

研究成果の概要(和文)：

超新星爆発など中性子が大量に放出される爆発的要素合成(r過程)において、重要な役割を果たしたと考えられる非常に中性子過剰な原子核(質量数 A~110: Kr-Tc)のベータ崩壊の実験を行った。38個の中性子過剰な原子核の半減期を精度よく測定することに成功した(内18個は初)。標準的理論予測との系統的な比較の結果、ジルコニウム、ニオブ(Z=40, 41)は2倍以上速く崩壊することが明らかになった。これは、r過程のプロセス速度が想定以上に速く、質量数 A=110~125 近傍の1桁以上も少ない生成量の謎を解く重要なヒントを得た。

研究成果の概要(英文)：

The beta-decay half-lives of 38 neutron-rich isotopes (18 for first time) from Kr to Tc, which play important role in the r-process nucleosynthesis, have been measured. The results when compared with previous standard models indicate the overestimation in the predicted half-lives by a factor of 2 or more in the A ~ 110 region. The results suggest a more rapid flow of the rapid neutron capture process (r-matter flow) through this region around mass A=110~125 than previously predicted.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：元素合成、ベータ崩壊、半減期、不安定核、超新星爆発、r過程

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発あるいは中性子星の合体において、中性子が大量に放出されたと考えられる。この爆発過程における急速な中性子捕獲過程は、軽原子核からウラン領域まで一挙に中性子過剰核を生成した。その後、中性子密度の低下に伴い β 崩壊を経て安定な原子核へと降り積もった。この爆発過程の残像は、現在の太陽系における特異な元素比スペクトル構造に見いだせる。原子核の魔法数を如実に示す鋭いピークの下辺にある特異な幅広の第1, 2, 3ピーク構造は、かつて中性子過剰核領域を経た元素合成の残像と考えられる。しかし、その詳細なメカニズムは謎に包まれており、理論計算による超新星爆発の再現も未だ成功した例がなかった。この元素合成の問題を解く鍵は、数千種もの中性子過剰領域の半減期($T_{1/2}$)、中性子放出確率(P_n)、質量(Q_β)の大規模・高精度データ収集にある。重元素合成(r過程)の解明を目的とした原子核実験は、欧州と米国(GSI, CERN, GANIL, MSU)を中心に精力的に行われてきた。GSI研究所は、1997年に ^{238}U ビームを利用した実験により、 ^{78}Ni (魔法数: $Z=20, N=28$)の発見に成功する(他、57種のアイソトープの発見)。さらに、2005年米国・MSUグループは、 ^{78}Ni の半減期測定に成功し話題となった。合計10事象と統計精度に問題はあがるが、核構造・元素合成の研究分野において議論を呼んだ。一方、国内においては、生成能力・粒子識別能力の問題により取り残されてきた。2007年、いよいよRIBF加速器が稼働により、350AmeVの大強度ウランビームを用いた世界最高性能を誇る不安定核生成能力と70mの超伝導ビームラインを利用した粒子識別能力を利用し、鉄以上の重い中性子過剰核(約千種)の生成・識別により重い不安定核の研究が実現できる状況となる。これは、世界に先駆けた元素合成過程の再現実験を行う絶好のチャンスといえる。一方、欧州の研究所においても、大規模な加速器増強計画が予定されている

2. 研究の目的

我々の周りに存在する鉄以上の重い原子核の約半分は、非常に中性子密度の高い環境で一挙に作られたと考えられている。その候補として超新星爆発、中性子星の合体などが挙げられているが、いまだ爆発的要素合成(r過程)の場所が明らかにされていない。

このr過程の詳細なメカニズムを調べる上で爆発環境における温度、中性子密度、に加え、精密な原子核の質量、半減期の理論予想を取り入れた詳細な元素合成プロセスのシミュレーション計算が重要な鍵を握る。

r過程経路上に位置する非常に中性子過剰な原子核の基礎的な情報は全く無いために、原子核の標準的な理論値を取り入れた計算が行われてきた。太陽系の元素存在比の予想スペクトルを観測データと比較した結果、第2ピークの下辺(質量数 $A=110\sim 125$)において、1桁も低い生成量を持つ凹み大きな謎となっている。この問題についてShell Quenchingなどの議論が話題を呼んでいる。この食い違いを定量的に議論するためには、第1ピーク(中性子数 $N=50$)から第2ピーク($N=82$)の領域の非常に中性子過剰な原子核の質量、半減期の情報が必要不可欠となる。

装置開発: r過程の経路上に位置する非常に中性子過剰な原子核の基礎的な性質を調べるためには、大強度重イオン加速器を利用した原子核の測定実験を行う。もっとも重要となる非常に中性子過剰な原子核は、一日に数個程度しか作ることができないため、生成した原子核を確実に捕獲し、その質量、半減期、中性子放出確率を測定するための高検出効率を特長とする検出器の製作が必須となる。本研究では、高統計・高精度のベータ崩壊実験を実現されるための測定装置の開発・設計・製作を行う。そして、大強度ウランビームを利用した非常に中性子過剰な原子核のベータ崩壊の測定を実施し、必要となる半減期、質量、中性子放出確率、さらに励起レベルの系統的な議論を行う。そして、第2ピークまでの元素合成の解明を目指す。

3. 研究の方法

r過程が経由したと考えられる非常に中性子過剰な原子核の基本的な性質である半減期($T_{1/2}$)、中性子放出確率(P_n)、質量(Q_β)を効率的にかつ高精度で測定することが要求されている。特に、非常に中性子過剰な原子核の半減期は、r過程の直接的な入力情報として非常に重要な情報となる。そこで、**短期戦略**としてアイソトープ探索、半減期、短寿命アイソマー探索を実施する。さらに**長期戦略**として中性子放出確率、質量を視野にいれた測定装置の開発を行う。

短期戦略: 理研の世界最高性能を誇る大強度ウランビームを用いた効率的なベータ崩壊実験を実現するために、高検出効率型ベータ線検出器として①両面ストリップ型半導体検出器と革新的なアイ

ディアに基づいた②高速ベータ検出器装置 (CAITEN)を開発する。

①両面ストリップ型半導体検出器：両面ストリップ型半導体検出器を利用したベータ崩壊測定は、コンパクトかつ高いエネルギー分解能をもつため、ガンマ線検出という観点から利点をもつ。稀少な原子核のベータ崩壊研究を成功させるためには、課題となる低エネルギーのベータ線(20keV～)の検出効率を20%から80%程度まで向上させる必要がある。一方、原子核を打ち込む際のエネルギー損失(～4GeV)の測定を両立させた読み出し回路の開発が必要となる。この相反する性能を満たすために、特殊な読み出し回路を開発・導入する。

②高速ベータ線検出器(CAITEN)：重元素合成の研究において、存在分布比と直接関係する半減期測定($T_{1/2}$)の測定が最重要課題となる。新同位体探索などビーム強度が高く、多種類の中性子過剰核を同時に取り扱う条件において、希少な中性子過剰核の半減期を効率的に測定することは困難である。そこで、革新的な測定手法に基づいた半減期一括測定装置 CAITEN を考案・製作する。この装置は、円筒型プラスチック・シンチレータ(40,000個のピクセル型プラスチック・シンチレータ：サイズは $\phi 50\text{cm} \times 100\text{cm}$)と位置検出型光電子増倍管を組み合わせた構造になっている。生成された中性子過剰な原子核は、このプラスチック・シンチレータに埋め込み、この円筒型シンチレータを回転&上下移動させることにより、入射原子核とベータ崩壊に放出されるベータ線の位置と時間の相関を調べることにより、効率的な半減期測定を実現している。

長期的戦略：非常に中性子過剰な領域においては、遅発中性子放出確率が急激に上昇すると予想されている。この領域の遅発中性子放出確率は、超新星爆発後の β 崩壊過程の経路を変更させ、元素存在スペクトルのピーク構造、微細な凹凸構造に影響を与える。また、核構造の側面として、第1禁止遷移との依存性について議論されている。高検出効率の中性子測定装置の開発を行い、中性子放出確率の精密測定に発展させる。

軽い不安定核で魔法数の消失・発現が発見されたように、 ^{78}Ni を含めた重い領域においても魔法数が消失する可能性がある。そこで、不安定核の中性子過剰な原子核のベータ線エネルギー測定をおこない、質量情報(Q_β)を測定することを視野にいれた開発を行う。

4. 研究成果

両面ストリップ型半導体検出器&ベータ崩壊

実験：低エネルギーのベータ線の測定を実現するために、前段増幅回路、波形増幅回路、トリガー系の回路の開発を行った。その結果、これまでにない高性能ベータ線検出回路の構築に成功した(10keV～)。さらに、入射原子核の埋め込み位置を特定する必要があるため、前段増幅回路の並列読み出し回路を開発した。その結果、20keV～5GeVの広いダイナミックレンジに対応した読み出し回路の開発に成功した。

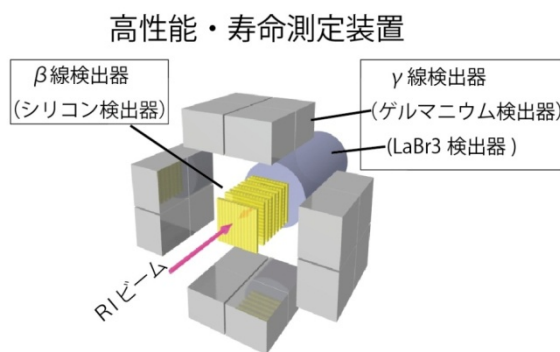


図1 開発した高性能・寿命測定装置

2009年末のウラン・ビームを利用した最初の元素合成に関わる β 崩壊実験を実施した。約8時間のデータの解析を進めた結果、非常に中性子過剰な38個の原子核(Kr～Tc)の半減期測定に成功した^{*1}。(内、18個の寿命測定は世界初)この観測値をこれまでの標準的な理論予想と比較した結果、Kr, Rb, Sr, Y, Mo, Tcは非常に中性子過剰核になると予想値があってくることが判った。しかし、ZrとNb($Z=40-41$)は非常に中性子過剰な領域において、予想よりも1/2～1/3も寿命が短いという非常に興味深い結果を得た。これは、「予想以上に速くr過程が進んだのでは？」という傾向を示唆している。この質量領域は、元素存在比の第2ピーク直下($A=110-125$)に位置しており、これまで謎となっている1桁の低い生成量の謎を解くヒントとなる。

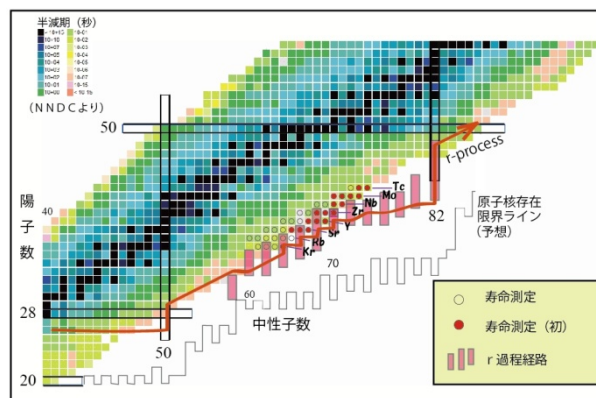


図2：○は寿命の測定に成功した38個のRI。●

は世界で初めて寿命測定した 18 個の RI。超新星爆発における重元素合成過程 (r 過程) の経路上の RI に初めて実験的に踏み込むことに成功した。

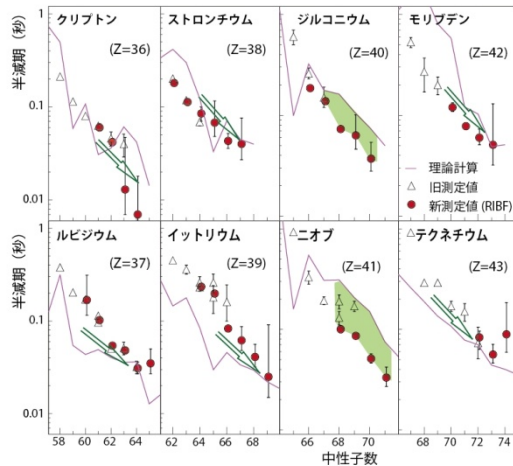


図 3 : 半減期の中性子過剰度依存性

この110Zr近傍の原子核は、変形でも注目されている。そこで、高純度ゲルマニウム検出器を利用した $\beta \cdot \gamma$ 分光の解析も行った。その結果、中性子数N=64が変形魔法数であることが判った^{※2}。

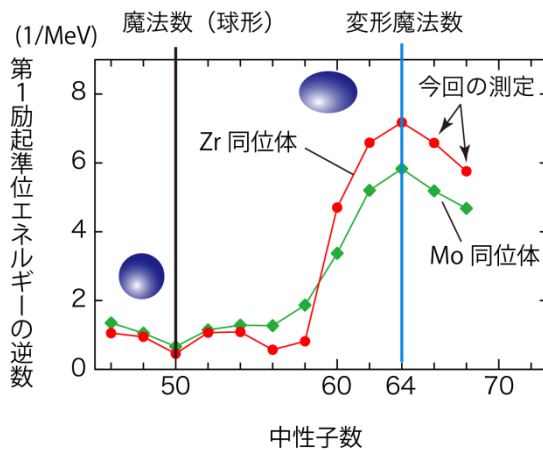


図 4 : 第 1 励起準位エネルギーの逆数の中性子依存性。変形魔法数の中性子数 64 で変形が最大化 (Zr, Mo 同位体)。

※1 S.Nishimura, et al. Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 052502.

※2 T. Sumikama, et al, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 202501.

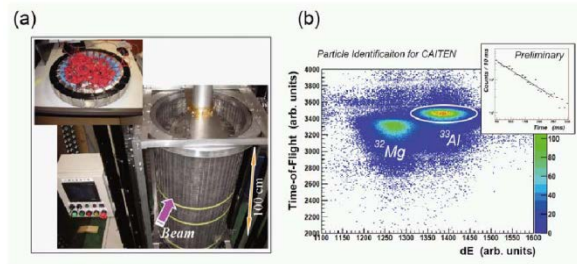
高速ベータ線検出器 (CAITEN) & ベータ崩壊実験 :

革新的な半減期一括測定装置 (CAITEN) の性能評価を行うために、比較的よく知られている不安定核 (^{32}Mg , ^{33}Al) を毎秒千個の強度で埋め込むテスト実験を行った。その結果、高速で半減期が測定であることを確認した^{※3}。さらに、大型LaBr3検出器と組み合わせることにより、非常に高速かつ高検出効率の遅延ガンマ線検出が実現可能であることを確認した。

2010年末、Caビームを利用したインフライト・ビームのキャンペーン実験が実施された。そこで、最下流で不要となった中性子過剰な原子核 (RI) をCAITEN装置に埋め込む再利用型 β 崩壊一括測定実験を実施した。大強度ビームにおいてその威力を発揮する革新的な半減期測定装置 (CAITEN)、 γ 検出器 (Ge検出器, LaBr3検出器)、中性子検出器 (液体シンチレータ) を組み合わせることにより、高統計・高精度 β スペクトロスコピー実験を実現した。長期実験 (約22日) の測定により、かつてない広範囲の中性子過剰な原子核 (Ne, Na, Mg, Al, Si) の β 崩壊測定実験に成功した。データ解析の結果、非常に中性子過剰な原子核の遅発 γ 線に威力を発揮することを確認した。

図 5 : CAITEN装置 (左)、ベータ崩壊の測定

※3 S.Nishimura, AIP Conf. Proc. 1269 (2010)



91-97

中性子検出器: 今後の r-過程の研究を進める上で、中性子放出確率を精度良く測定する必要がある。そこで、高検出効率を特長とする中性子検出器の導入を行った。さらに、中性子検出効率の定量的な評価を行うために、MCNP 解析コードを導入したシミュレーション計算を進めた。その結果、 β 線検出器の周囲を覆う検出器・設計が重要な鍵を握ることがわかった。 β 崩壊に伴い放出される中性子の放出確率を精度よく測定するべく、 ϕ 2.54cmx30cm (ガス圧 5atm) のプロポーショナル検出器 26 本を製作した。

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 11 件)

① S.Nishimura, (筆頭、48名) et al., “ β -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 106, 0525021 (2011) 1-5. (査読有)

② T.Sumikama, K.Yoshinaga, H.Watanabe, S.Nishimura, et al., (4番目, 47名)
“Structural Evolution in the Neutron-Rich Nuclei ^{106}Zr and ^{108}Zr ”, Physical Review Letters 106, 202501 (2011) 1-4. (査読有)

③ H.Watanabe, T.Sumikama, S.Nishimura, et al. (3番目, 49名) “Low-lying level structure of the neutron-rich nucleus ^{109}Nb : A possible oblate-shape isomer”, Physics Letters B 696 (2011) 186-190. (査読有)

④ S.Nishimura, (単著) “First Decay Experiment at RIBF”, AIP Conf. Proc. 1269 (2010) 91-97. (査読有)

⑤ T.Ohnishi, et al. (20番目, 60名)
“Identification of 45 New Neutron-Rich Isotopes Produced by In-Flight Fission of a 238U Beam at 345 MeV/nucleon”, Journal of the Physical Society of Japan 79, 073201 (2010) 1-5 (査読有)

⑥ S.Nishimura, et al., (筆頭、)
“Beta-counting systems for decay spectroscopy projects”, RIEKN Accel. Prog. Rep. 42, 183 (2009) (査読有)

⑦ P.Doornenbal, et al., (35番目, 54名)
“Spectroscopy of ^{32}Ne and the Island of Inversion”, Physical Review Letters 103, 032501 (2009) 1-4. (査読有)

⑧ J.J.He, et al. (7番目, 17名)
“Investigation of excited states in ^{32}Mg via resonant scattering of $^{21}\text{Na} + p$ and its astrophysical implications”, Physical Review C 80 015801 (2009) 1-6. (査読有)

⑨ H. Yamaguchi, et al. (9番目, 15名)
“Low-lying non-normal parity states in ^8B measured by proton elastic scattering on ^7Be ”, Phys. Lett. B 672 (2009), 230-234. (査読有)

⑩ S.Nishimura, et al (筆頭、6名)
” Development of a super-segmented beta-counting system CAITEN”

RIKEN Accel. Prog. Rep. 41 (2008) 149.
(査読有)

⑪ N.Uematsu, S.Nishimura, (2番目, 2名)
“Development of wide-dynamic range readout system of silicon detector from 20keV to 4GeV” RIKEN Accel. Prog. Rep. 41 (2008) 151.
(査読有)

[学会発表] (計 7件)

① 西村俊二(代表: Invited) “Measurement of Beta Decay Rates for the r-Process” ECT* 「The Origin of the Elements: A Modern Perspective」2011年5月16-20日 (Italy, Trento)

② S.Nishimura (代表: Invited)
“First Decay Spectroscopy at RIBF” 「Nuclear Structure 2010」
2010年8月8-13日 (USA, Berkeley)

③ S.Nishimura (代表: Invited) “First Decay Experiment at RIBF”, OMEGA10, 2010年3月8日 Osaka

④ S.Nishimura(代表: Invited) “First Decay Experiment at the RIBF”, ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2010), 2010年2月19日、東京大学・本郷キャンパス

⑤ S.Nishimura(代表), “First results from RIBF and the scope”, 3rd Joint Meeting of Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS、2009年10月13日、USA・Hawaii

⑥ S.Nishimura(代表: Invited),
“Decay spectroscopy experiments and spin-isospin”, ICHOR - EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2008), 2008年10月30日, Saitama, Japan

⑦ 西村俊二(代表),
” 回転式シンチレーション検出器を用いた半減期測定装置の開発”、日本物理学会、2008年3月24日、近畿大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 俊二 (NISHIMURA SHUNJI)

独立行政法人理化学研究所・櫻井RI物理研究室・前任研究員

90272137