



Title	β - γ spectroscopy of neutron-rich rare-earth nuclei 156,157,158Pr and 158Nd
Author(s)	Mukul, Khandelwal
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/105634
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (Mukul Khandelwal)	
Title	β - γ spectroscopy of neutron-rich rare-earth nuclei $^{156,157,158}\text{Pr}$ and ^{158}Nd (中性子過剰希土類原子核 $^{156,157,158}\text{Pr}$ および ^{158}Nd の β - γ 核分光)
Abstract of Thesis The neutron-rich rare-earth nuclei in the mass $A \sim 160$ region belong to one of the deformed sectors of the nuclear chart. The systematic reduction of the first excited 2^+ state energy, $E(2^+)$, for even-even nuclei, with varying proton number Z or neutron number N, is widely recognized as an indicator for the presence of ground-state deformation for nuclei in this mass region. Based on the $E(2^+)$ systematics, the Nd ($Z=60$) nuclei are identified as the most deformed nuclei, with the deformation expected to decrease away from Nd. In the present study, we aim to explore this change in deformation around Nd by examining two neighboring odd-odd nuclei, ^{156}Pr ($Z=59$) and ^{158}Pm ($Z=61$), which share the same neutron number ($N=97$) and lie on opposite sides of Nd. This investigation is carried out through β-γ decay spectroscopy of even-mass nuclei, ^{156}Pr and ^{158}Nd. In addition, this work also aims to measure the $2^+ \rightarrow 0^+$ transition energy in ^{158}Nd ($N=98$), which has not yet been directly measured and is essential for interpreting the deformation trend in the Nd isotopes. The present work also reports the β-γ decay spectroscopy result for ^{157}Pr. The experiment was conducted at the Radioactive Isotope Beam Factory, RIKEN Nishina Center, within the Euroball RIKEN Cluster Array (EURICA) campaign. The neutron-rich rare-earth nuclei were produced via in-flight fission of a ^{238}U beam with an energy of 345 MeV/nucleon and an intensity of ~ 5 pA, incident on a 4-mm-thick ^9Be target. The fragments produced were separated and identified using the BigRIPS separator and delivered to the experimental setup placed downstream. An active stopper composed of five double-sided silicon-strip detectors, called WAS3ABi, was used for ion- and β-ray detection, while an array of Ge detectors, EURICA, was utilized for γ-ray detection following β-decay, enabling the performance of β-γ spectroscopy. The ^{157}Nd nucleus is investigated for the first time via the β-decay of ^{157}Pr, revealing one short-lived delayed-γ-ray photopeak along with several low-intensity peaks. For ^{158}Nd, the previously unobserved $2^+ \rightarrow 0^+$ transition energy has been measured for the first time through the β-decay of ^{158}Pr. It is observed that, based on the $E(2^+)$ energy systematics, the deformation in Nd nuclei would increase at least up to the $N=100$ isotope. In the case of ^{158}Pm, nine new γ-rays and seven new excited states have been identified following the β-decay of ^{158}Nd, enabled by the first-ever construction of the β-decay scheme of ^{158}Nd to ^{158}Pm. Within this scheme, tentative spin-parity assignments are suggested for the ground and newly observed excited states in ^{158}Pm. Similarly, eight new γ-rays and five new excited states in ^{156}Nd have been established through the β-decay of ^{156}Pr, based on the first-ever construction of the β-decay scheme of ^{156}Pr to ^{156}Nd. Spin-parity assignments to the parent ^{156}Pr ground state, and the newly excited states in ^{156}Nd are tentatively proposed based on the obtained β-decay scheme. Interestingly, to explain the observed β-decay scheme of ^{156}Pr to ^{156}Nd, a tentative spin-parity assignment of (4^-) is proposed for the ground-state of ^{156}Pr. This involves a change in the neutron Fermi surface at $N=97$ in the Nilsson diagram, shifting from the commonly occupied $\nu 5/2[523]$ orbital to the $\nu 5/2[642]$ orbital. Such a change may potentially indicate a reduction in nuclear deformation when moving from Pm ($Z=61$) to Pr ($Z=59$) across the Nd ($Z=60$) nuclei. This thesis reports the first β-γ decay spectroscopy results for $^{156,157,158}\text{Pr}$ and ^{158}Nd nuclei.	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (MUKUL KHANDELWAL)			
論文審査担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	大田 晋輔
	副 査	教授	川畑 貴裕
	副 査	教授	石川 貴嗣
	副 査	准教授	吉田 賢市
	副 査	准教授	井手口 栄治

論文審査の結果の要旨

質量数 160 領域の中性子過剰希土類原子核の中で Nd(Z=60) 同位体とその近傍の Pr(Z=59), Pm(Z=61) 同位体を対象に、 β - γ 分光法を用いてそこに現れる変形構造がどのように現れ、核子数の変化と共にどのように変化するかを系統的に調べることにより、それをもたらし配位構造を明らかにし、更に宇宙での r 過程元素合成にどのように寄与するのかを議論した論文である。

陽子数 Z または中性子数 N が魔法数に対応する原子核は閉殻構造に対応し球形形状を示すが、Z=50, 82, N=82, 126 の魔法数の間の中性子過剰領域では魔法数から離れるに伴い変形が発達する傾向が見られた。変形状態の指標となる 2^+ 励起エネルギーについて陽子数に対する系統性を見ると 2 つの魔法数の中間領域から少しずれた Z=60 の Nd 同位体で、中性子数では N=100 近傍で最大の変形を示唆していたが、特に N=98 及び N=104 で大きな変形の出現に対応する 2^+ 励起エネルギーの極小が現れていた。これらを明らかにするため、Z=60、N=98 の ^{158}Nd とそれに隣接する $^{156}, ^{157}, ^{158}\text{Pr}$ の β 崩壊が調べられた。

実験は理化学研究所仁科加速器センターの RIBF 施設で行われた。中性子過剰希土類核 RI ビームはエネルギー 345MeV/u の ^{238}U ビームを ^9Be 標的に照射し ^{238}U の飛行核分裂により生成された。生成片は BigRIPS 分離装置で分離・同定され下流の実験装置へ輸送された。RI ビームは 5 枚の両面ストリップ型 Si 検出器で構成される WAS3Abi ストップパーで止められ、入射イオンと β 線を検出しつつ、周りに配置された Ge 検出器アレイ EURICA で γ 線が測定され、 β - γ 分光が行われた。

データ解析により ^{158}Nd での $2^+ \rightarrow 0^+$ 遷移エネルギーを決定し、 $^{158}\text{Nd} \rightarrow ^{158}\text{Pm}$ 、 $^{158}\text{Pr} \rightarrow ^{158}\text{Nd}$ 、 $^{157}\text{Pr} \rightarrow ^{157}\text{Nd}$ 、 $^{156}\text{Pr} \rightarrow ^{156}\text{Nd}$ の β 崩壊様式が構築された。その結果 ^{158}Nd の β 崩壊に続く 9 つの新規 γ 線と 7 つの新規励起状態が同定され、基底状態および励起状態のスピン・パリティがアサインされた。また、 ^{156}Pr の β 崩壊から ^{156}Nd における 8 つの新たな γ 線と 5 つの新たな励起状態が確立された。更に親核 ^{156}Pr の基底状態および ^{156}Nd の新規励起状態に対するスピン・パリティがアサインされた。この結果 ^{156}Pr の基底状態のスピン・パリティが (4^-) で $\pi 3/2[541] \otimes \nu 5/2[642]$ の配位構造を持つ事が提案されたが、これは N=97 の中性子フェルミ面の変化を伴い、97 番目の中性子が $\nu 5/2[523]$ 軌道から $\nu 5/2[642]$ 軌道への移行を意味する。この変化は Pm (Z=61) から Nd (Z=60) 核を経由して Pr (Z=59) へ移行する際に、核変形の減少を示唆している。

以上から中性子過剰希土類原子核で Nd が最も大きな変形を示し、変形度の増加が少なくとも N=100 まで継続することが示された。このような ^{160}Nd 近傍での最大変形の出現は太陽系元素組成での質量数 160 付近のピーク形成に寄与すると考察された。

本論文は、実験、データ解析、結果に対する議論で構成されている。実験やデータ解析、論理展開は高度な水準であると判断した。N=97 での一粒子軌道に関する解析結果とそれに伴う変形度の変化は r 過程元素合成の理解を進める上で新たな知見を与えており、学術的な価値は非常に高いと評価できる。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として十分価値あるものと認める。