

氏 名	岡井 晃一		
授与した学位	博 士		
専攻分野の名称	理 学		
学位授与番号	博乙第	4 5 6 7	号
学位授与の日付	2 0 2 5 年 3 月 2 5 日		
学位授与の要件	博士の論文提出者 (学位規則第4条第2項該当)		
学位論文の題目	Observation of the Radiative Decay from the Isomeric State of Thorium-229 (トリウム 229 原子核アイソマー状態からの脱励起光の観測)		
論文審査委員	教授 石野 宏和	教授 池田 直	准教授 小汐 由介
学位論文内容の要旨			
<p>The nucleus of thorium-229 (<math>^{229}\text{Th}</math>) possesses the lowest known first excited state among all isotopes. The transition energy from the ground to this first excited state has been measured around 8 eV. And the lifetime of the excited state is approximately 1800 s. This metastable nuclear state, referred to as <math>^{229\text{m}}\text{Th}</math>, is of significant interest due to its unique properties. This state has stimulated considerable interest in its potential applications, especially given that <math>^{229}\text{Th}</math> appears to be the only isotope with a nuclear-excited state that can be accessed using lasers. The most promising application of this unique state is the development of an optical clock.</p> <p>Although the nucleus interacts with its surrounding environment, a high-precision clock is achievable even in a solid-state context due to the large number of nuclei (<math>&gt; 10^{16}</math>) within the doped crystal. Such a clock would serve as an exceptionally sensitive probe for new physics owing to the distinct nature of the nuclear excitation.</p> <p>This thesis reports on the methodology by which we successfully excited <math>^{229}\text{Th}</math> doped in calcium fluoride <math>\text{CaF}_2</math> using X-ray irradiation and observed the vacuum ultraviolet (VUV) signal emitted during its de-excitation, thereby determining the corresponding wavelength. We have been conducting research on <math>^{229}\text{Th}</math> at SPring-8 since 2014 and obtained significant results during the beam times in February, May, and July of 2023. For this experiment, we developed a detection system capable of observing signals in the vacuum ultraviolet (VUV) region, which is essential for the study.</p> <p>The isomeric state of thorium (<math>^{229\text{m}}\text{Th}</math>) was generated via the second excited state of the <math>^{229}\text{Th}</math> nucleus. To detect the de-excitation signals accompanied by photon emission from <math>^{229\text{m}}\text{Th}</math> and determine its wavelength, we constructed an optical system optimized for the VUV region to enhance the signal-to-noise ratio (S/N) by anti-coincidence scheme and optical suppression. For precise wavelength determination, band-pass filters (BPF) with different transmission spectra were employed. A critical factor in this method is each optical element's wavelength-dependent reflectance or transmittance. Before the experiments at SPring-8, the author established the optics characterization system, which allows us to evaluate the performance of almost all optical elements at the laboratory of Okayama University. As a result, we achieved a wavelength resolution of 1 nm and an absolute accuracy of 0.1 nm.</p> <p>By the measurement result of three beamtimes at SPring-8, we succeeded in determining the absolute energy (<math>\lambda = 148.18(42) \text{ nm}</math>) and lifetime (<math>\tau = 645(36) \text{ s}</math>) of <math>^{229\text{m}}\text{Th}</math>. We also observed a shortened isomeric state's lifetime (quenching) by X-ray beam irradiation for the first time. It was discovered that the effective lifetime of <math>^{229\text{m}}\text{Th}</math> decreases depending on the intensity of the X-ray beam used for its generation and is inversely proportional to the beam flux.</p> <p>The results of this study represent an essential step toward realizing a nuclear clock.</p>			

## 論文審査結果の要旨

トリウム<sup>229</sup>原子核は、全アイソトープの中で最も小さい第1励起エネルギー(約8 eV)を有することが知られている。トリウム原子が1+以上のイオン化状態にあるとき、内部変換が抑制されるために、長寿命を有することが知られ、<sup>229m</sup>Thと記される。核励起エネルギーが小さいことから、レーザー光による励起が原理的に可能であるため、<sup>229</sup>Thをドープした固体物質を用いれば、原子核時計の作製が可能であると考えられる。期待される時計の精度は従来よりも一桁改善される見込みで、素粒子標準模型を超える物理現象の検証として応用されると期待される。原子核時計の実現の第一歩として、<sup>229m</sup>Th状態を作り、その第1励起状態のエネルギー準位を正確に測定することが求められる。

本論文では、<sup>229</sup>ThをドープしたCaF<sub>2</sub>結晶にX線を照射し、<sup>229</sup>Thを第2励起状態にし、脱励起後<sup>229m</sup>Thを生成して、それらからの基底状態への脱励起紫外線を観測することにより、第1励起状態のエネルギー準位を決定したことが報告された。学位申請者の岡井氏は、脱励起紫外線を測定するために、背景事象を抑制するための反同時計測手法と迷光対策を行った光学系を開発した。また、脱励起紫外線の波長を正確に決定するために、バンドパスフィルターの開発と性能評価を行った。その結果、波長の絶対値に対して0.1 nmの精度を達成した。SPring-8においてX線の照射実験を行ったところ、<sup>229m</sup>Thからの脱励起紫外線の観測に成功し、その波長(148.18(42) nm)と寿命(645(36) s)の測定に成功した。また、<sup>229m</sup>Thの寿命が照射X線強度に反比例することが世界で初めて発見された。その原因は今のところ不明であり、今後の調査を要する。以上の結果は、原子核時計実現に向けた重要なマイルストーンであり、その成果は大きく評価できる。

岡井氏は、第一著者としてNature Communicationsに本学位論文の内容を含む成果を既出版しており、岡井氏の研究は、脱励起紫外線の波長を決定する上で本質的な寄与であった。共著者として5本の論文を出版し、学会発表において多数回成果発表している。博士論文審査会では、丁寧な説明とはっきりとした受け答えができていた。以上のことから、岡井氏は博士学位に相当する能力を有すると判断し、合格と判定する。