

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01094

研究課題名（和文）原子核のレーザー分光に向けたトリウム229アイソマー状態からの脱励起光探索

研究課題名（英文）Search for deexcitation light from the ^{229}Th isomeric state for laser spectroscopy of nuclei

研究代表者

平木 貴宏（Hiraki, Takahiro）

岡山大学・異分野基礎科学研究所・特任助教

研究者番号：40791223

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究期間中 ^{229}Th がドーブされた CaF_2 結晶（共同研究しているウィーン工科大学のグループが作成した）を用いて放射光施設SPRING-8にて ^{229}Th 原子核第一励起状態から放出される真空紫外領域の光を観測することに成功した。また結晶中での第一励起状態の寿命を測定し、特定の波長のみを透過させるバンドパスフィルターを用いることで波長を0.4 nm程度の精度で決定した。更に、X線ビーム照射中は第一励起状態の寿命が優位に短くなることを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トリウム229原子核を用いた「原子核時計」の開発に成功すれば、現在の秒の定義に用いられている原子時計と同等以上の高精度な時計（周波数標準）が実現できると期待されている。また、素粒子標準理論を超えた物理の一つの可能性として微細構造定数が時間変化するモデルが宇宙論で考えられているが、原子核時計を用いて遷移周波数の安定性を長期間測定することでこれまでより微細構造定数の時間変化を数桁程度更新できると考えられている。本研究では研究開始時には精度良く分かっていなかった ^{229}Th 原子核の第一励起状態の寿命を精度良く測定することに成功し、原子核時計の実現に一步近づくものとなった。

研究成果の概要（英文）：Thorium-229 (^{229}Th) has a very low first excitation energy of about 8.4 eV and is expected to have applications such as nuclear clocks. We succeeded in observing the light in the vacuum ultraviolet region emitted from the first excited state of ^{229}Th nucleus at SPRING-8 using ^{229}Th -doped CaF_2 crystals developed by TU Wien. The lifetime of the first excited state in the crystal was measured, and the wavelength was determined with an accuracy of about 0.4 nm by using band-pass filters. Furthermore, we found that the lifetime of the first excited state is shortened during X-ray beam irradiation.

研究分野：素粒子原子核物理学

キーワード：トリウム229 原子核 アイソマー 真空紫外光

1. 研究開始当初の背景

原子核の励起エネルギーは通常 keV から MeV のスケールである。その一方、トリウム同位体の一つ ^{229}Th は、第一励起エネルギーが 8 eV 程度と原子核の中で最低であり、しかも極端に低い(2番目に低い ^{235}U は 78 eV で、他は全て 1 keV 以上である)。また、その準位は準安定状態(アイソマー状態)であることが知られている。第一励起エネルギーは真空紫外領域に対応するため、 ^{229}Th は真空紫外レーザーにより励起することが可能で、近年原子核物理のみならず原子物理・放射化学などといった幅広い分野で注目を集めている。特に原子核は外乱の影響を受けにくいという利点があるため、現在秒の定義に用いられている原子時計を超える周波数精度を持つ原子核時計の実現が考えられている。またこの原子核時計を用いた新物理探索も考えられている。微細構造定数はその名の通り通常時間依存しない定数と考えられているが、素粒子標準理論を超える物理で微細構造定数の時間変化を予言している理論が存在する[1]。近年 ^{229}Th 原子核に関する研究は急速に進展しているものの、レーザー励起は未だ実現していない。また、第一励起準位からの脱励起光の観測は未達成であった(本研究期間中海外のグループ[2]と我々のグループ[3]が独立に観測に成功した)。

2. 研究の目的

この研究の本研究期間中の最終目標は以下に示す核共鳴散乱を用いた独自の手法を用いて ^{229}Th 原子核第一励起状態からの脱励起光を観測し、第一励起準位の光学遷移寿命の直接測定および第一励起エネルギーを高精度に決定することである。図1に ^{229}Th 原子核のエネルギー準位を示す。

- (1) まず大強度放射光施設 SPring-8 で利用できる単色 X 線バンチビームを用いて ^{229}Th を第二励起状態 (29.19 keV) に核共鳴励起させる。
- (2) 第二励起状態に励起された ^{229}Th の半分以上第一励起状態に遷移する。(半減期は我々のグループで測定し 82(4) ps である)
- (3) 第一励起状態から基底状態へ脱励起する真空紫外光を波長選択して光電子増倍管で観測する。

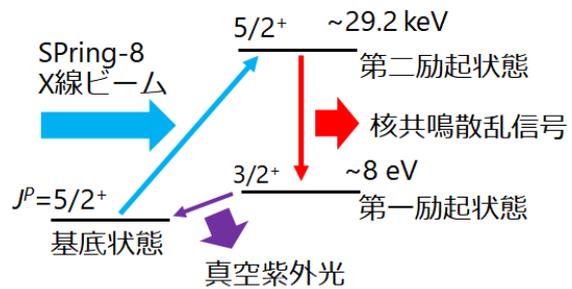


図1: ^{229}Th 原子核のエネルギー準位

3. 研究の方法

図2に真空紫外光探索実験セットアップの概要を示す[4]。この実験の標的には共同研究しているウィーン工科大学のグループが作成した ^{229}Th をドープした CaF_2 結晶を用いた。

実験は SPring-8 の BL19LXU で行った。ビームライン上流に設置した Si モノクロメータによってエネルギーの単色化を行った X 線ビームを一定時間真空チェンバー中に設置された結晶標的に照射する。照射停止後、圧縮空気を用いて照射チェンバーに接続された測定チェンバーへ結晶ホルダーを移動させる。

図2(下)のように、移動させた結晶から放出された光はミラーで集光され、4枚の波長選択コーティングがされた三角形プリズム型のミラーを反射し、 MgF_2 レンズで再び集光され、真空紫外領域にのみ感度のある PMT で検出される。標的に結晶を用いているため、結晶からのシンチレーション光が主な背景事象となる。波長選択性のミラーによって背景事象を削減しているが、特に radioluminescence (^{229}Th やその娘核が崩壊した際の発光) の検出レートが高いため、1番目のプリズムの後ろに設置された別の PMT を設置した。2つの PMT の anticoincidence によって radioluminescence を大幅に抑えることが可能になった。

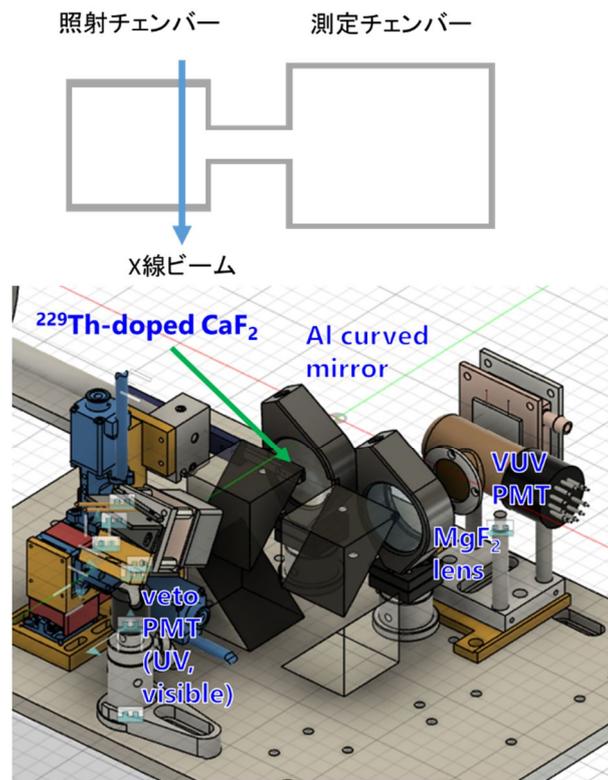


図2: (上)真空紫外光探索実験用真空チェンバー
(下)測定チェンバー内部

4. 研究成果

本研究期間中研究代表者の所属する岡山大学のグループは上に述べた真空紫外光検出用セットアップを改良し背景事象の削減と検出効率の改善に成功した[4]。ビームラインにインストールしたSiのモノクロメータは研究開始時にはSi(111)、Si(660)の2台を用意していたが、更なるX線ビームのエネルギー単色化のため研究分担者の依田が2023年Si(880)モノクロメータを用意し3台のモノクロメータで実験を行った。 ^{229}Th をドープした結晶については、研究開始時に使用していたものより濃度が10倍以上でradiolysisの影響がない CaF_2 の作成に成功し、2023年のビームタイムからSPRING-8の実験で使用した。以下では第一励起準位からの脱励起光の観測に成功した2023年のビームタイムの結果を示す。

図3はX線ビームのエネルギーを ^{229}Th 原子核第二励起エネルギー付近でSiモノクロメータを用いて変化させたときのスペクトルである。図3(下)のように第一励起状態からの真空紫外信号のピークが観測され、過去に制作した第二励起状態から脱励起する際に発生する特性X線信号を検出する装置を用いて観測されたピークのエネルギー(図3(上))と一致していることを確認した。図4は共鳴条件と非共鳴条件の差分の測定開始からの時間分布で、 CaF_2 結晶中の第一励起状態の寿命を6%以下の精度で測定した。更に真空紫外領域のバンドパスフィルターを用いて脱励起光の波長を約0.4 nmの精度で決定した。

事象数

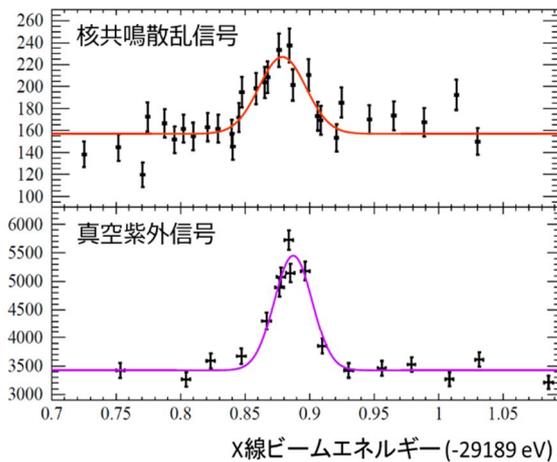


図3: (上) 核共鳴散乱信号のエネルギースペクトル
(下) 真空紫外光のエネルギースペクトル

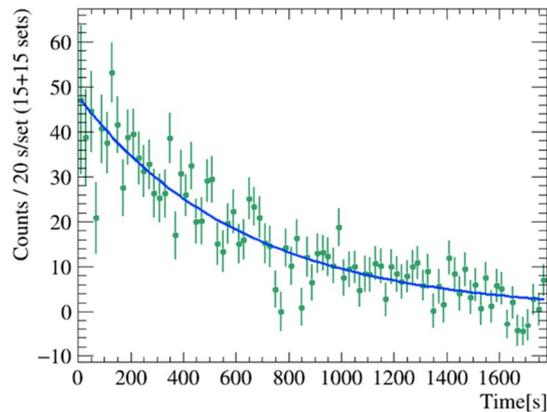


図4: ^{229}Th 第一励起状態からの脱励起信号の時間分布

図5はX線照射時間を変えた時の信号強度の時間変化を表したグラフである。信号強度が飽和する時間から、X線ビーム照射中の第一励起状態の寿命を測定することができる。測定した結果、照射中の寿命は照射後の寿命と比較して例えば図5の場合10倍程度短くなることを発見した。これは研究開始時には当初予期していなかった現象である。またビーム強度を変更して同様の測定を行い、照射中の寿命がビーム強度依存性を持つことを発見した。このことは第一励起状態がビーム照射中は通常の光放出脱励起と異なる何らかの過程で脱励起することを意味しているが詳細は不明で今後の研究が必要である。この効果は将来固体型の原子核時計を製作した際 ^{229}Th を基底状態に高速に脱励起させるのに利用できる可能性がある。

これらの結果は研究代表者が筆頭著者の論文[3]にまとめた。

信号強度

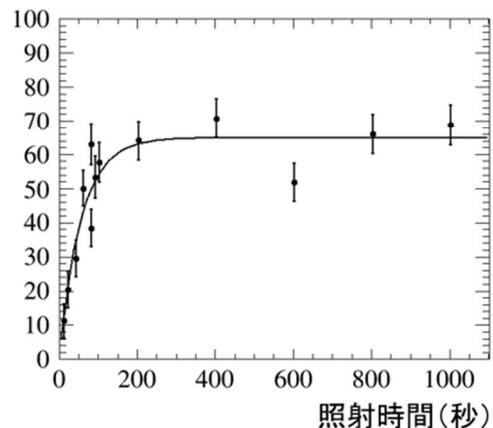


図5: 信号強度のビーム照射時間依存性

[1] A. Hees et al., Phys. Rev. D **98**, 064051 (2018)

[2] S. Kraemer et al., Nature, **617**, 706 (2023)

[3] T. Hiraki et al., arXiv:2405.09577, (accepted in Nature Communications)

[4] T. Hiraki on behalf of the collaboration, Hyperfine interactions, **245**, 14 (2024)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiraki Takahiro on behalf of the collaboration	4. 巻 245
2. 論文標題 Experimental apparatus for detection of radiative decay of ^{229}Th isomer from Th-doped CaF_2	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Interactions	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10751-024-01844-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 平木貴宏
2. 発表標題 固体中にドーブされた ^{229}Th アイソマー状態からの脱励起真空紫外光の観測
3. 学会等名 第12 回停止・低速RI ビームを用いた核分光研究会（12th SSRI）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平木貴宏
2. 発表標題 Search for the nuclear isomeric state of ^{229}Th toward nuclear clock
3. 学会等名 RCNP研究会 「中性子と原子で探る基礎物理」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平木貴宏
2. 発表標題 トリウム ^{229}Th アイソマー状態からの脱励起真空紫外光探索に 向けた高密度NRS標的開発
3. 学会等名 第16回核共鳴散乱研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平木貴宏
2. 発表標題 トリウム229アイソマー状態からの脱励起真空紫外光の探索
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平木貴宏
2. 発表標題 トリウム229アイソマー状態からの脱励起真空紫外光探索
3. 学会等名 日本物理学会第77 回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	依田 芳卓 (Yoda Yoshitaka) (90240366)	公益財団法人高輝度光科学研究センター・精密分光推進室・ 主幹研究員 (84502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------