

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20371

研究課題名（和文）トリウム229アイソマーからの脱励起光直接観測実現へ向けた超伝導転移端センサの開発

研究課題名（英文）Development of a detection system for direct observation of Thorium-229 de-excitation light

研究代表者

高取 沙悠理（TAKATORI, Sayuri）

岡山大学・異分野基礎科学研究所・学振特別研究員PD

研究者番号：90963348

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：トリウム229原子核はレーザー光で励起可能なエネルギー領域に第一励起準位（アイソマー準位）を持つことから、レーザーを用いた原子核時計の実現が期待される。本研究ではトリウム229をレーザー励起する上で長年の課題であったトリウム229のアイソマー準位のエネルギー不定性を解決すべく、放射光X線を用いトリウム229のアイソマー準位を生成する独自の励起手法によりアイソマー準位からの脱励起光の直接探索を行ってきた。検出系システムのアップデートを行い、最終年度ではアイソマー準位からの脱励起真空紫外光の直接検出により、トリウム229アイソマー準位のエネルギーと寿命を決定するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トリウム229は極低のアイソマー準位を持つことからレーザー光で励起可能な唯一の原子核であり、この極低の準位を応用したトリウム229原子核時計は、将来的に基礎物理から社会実用までの様々な応用が期待される。レーザー光による原子核操作を可能にするためにはトリウム229のアイソマー準位のエネルギーや寿命の情報が必要だが、この不定性が大きいことがこれまでレーザー励起を実現する上で長年の課題であった。そのため脱励起光の直接観測によりトリウム229のアイソマー準位のエネルギーや寿命を決定した本研究は、トリウム229のレーザー光励起へ向けた重要なマイルストーンの達成に貢献したと言える。

研究成果の概要（英文）：Thorium-229 nucleus has an isomeric level in the energy region that can be excited by laser light. Therefore, it is expected to realize a nuclear clock using laser light. In this study, in order to determine the energy of the isomeric level of Thorium-229, we generated the isomeric level by an original excitation method using synchrotron radiation X-rays and searched for de-excitation vacuum ultraviolet light directly from the isomeric level. In the final year, the energy and lifetime of the thorium-229 isomer were determined by detecting de-excitation vacuum ultraviolet light from the isomer level.

研究分野：宇宙物理

キーワード：トリウム229 真空紫外光 原子核時計

1. 研究開始当初の背景

トリウム 229 は原子核遷移としては特異な極めて低いエネルギーの第一励起準位を持ち、レーザー光で励起可能な唯一の原子核である。原子核時計はその実現により従来の周波数標準と比較し相対精度 1 桁以上の向上が期待されるため、将来的に基礎物理への応用だけではなく、実用化による社会的な波及効果も期待されており、その実現可能性の検証は急務である。レーザー光による原子核励起を可能にする為には、第一励起準位のエネルギーや寿命の情報が必須であるが、これまでこの不定性が大きいことがトリウム 229 のレーザー励起実現の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究ではトリウム 229 のレーザー励起実現へ向け、トリウム 229 の第一励起準位から基底準位へ脱励起する際の真空紫外光を探索し、これまで長年の課題であったトリウム 229 の第一励起準位のエネルギーと寿命を決定することを目指す。

3. 研究の方法

トリウム 229 の第一励起準位(アイソマー準位)のエネルギー測定のためには、まずアイソマー状態を安定して生成する必要がある。本研究では Spring-8 施設にて放射光 X 線照射により、エネルギーと寿命および分岐比が既知の第 2 励起状態に一旦励起し、そこからの脱励起過程を経て、アイソマー準位を生成する独自の方法を用いる[図 1]。この方法では、アイソマー準位のエネルギー不定性を気にせず、第 2 励起準位から脱励起する際の散乱 X 線の検出により確実にアイソマーの生成を確認することが可能である。さらに照射 X 線のエネルギーをわずかにずらすことで共鳴と非共鳴を制御し、放射光 X 線照射に由来するバックグラウンドを差し引きすることで、アイソマー準位から基底準位に脱励起する際に生じる真空紫外(VUV)光の直接探索を精度良く行うことができる。

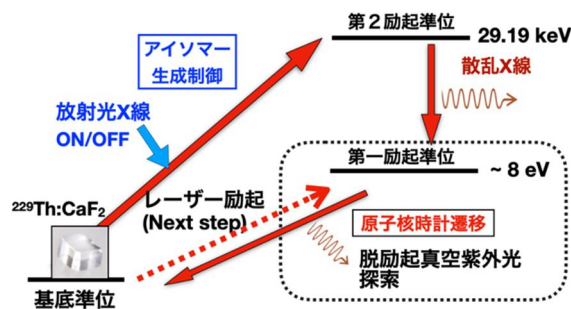


図 1 : 能動的にアイソマー準位を生成する。基底準位から励起し、第 2 励起準位から脱励起する際の散乱 X 線検出から確実にアイソマー準位の生成を確認できる。また、照射 X 線のエネルギーの調整によりアイソマー準位の共鳴と非共鳴の制御も可能である。

本研究では VUV 領域で透過率の高いフッ化カルシウム結晶にトリウム 229 をドープした結晶を標的として励起試験を行なった。照射された結晶標的は照射直後に検出チェンバー内[図 2]で VUV 領域に感度のある PMT で脱励起 VUV 光の観測を行う。検出チェンバー内には VUV 領域で波長分別が可能なダイクロイックプリズムミラー、また UV 領域に感度のある Veto PMT を配置することでトリウム 229 の放射性崩壊に由来する信号を検出しバックグラウンドを低減することが

可能である。初年度に当初の予想より早く上記の検出システムでアイソマー準位からの脱励起光検出を示唆する信号を得ることができたため、得られた信号を元に最短で検出システムの最適化を行い、事前に透過スペクトルを評価した複数枚の異なるバンドパスフィルタを PMT の前に挿入してそれぞれの透過率の違いにより、アイソマーのエネルギーの決定を試みた。

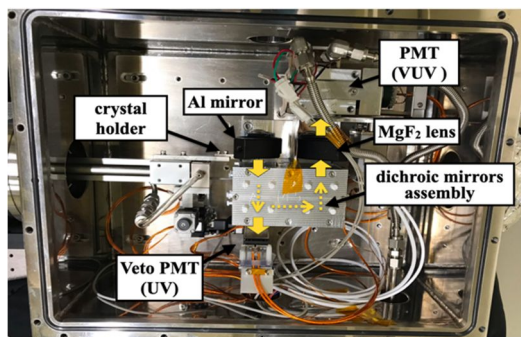


図 2: 検出器チャンバーの概要。結晶標的からの光は、結晶ホルダーの前に設置されたアルミミラーにより集光され、波長別可能なダイクロイックミラーで反射されたのち VUV PMT にて検出される。

4 . 研究成果

本研究では、放射光 X 線を用い遷移特性が既知の第 2 励起準位へいったん励起し、その脱励起過程を経てトリウム 229 のアイソマー準位を生成する独自の励起手法によりトリウム 229 原子核時計遷移時の脱励起光の探索を行ってきた。初年度で得られたアイソマー準位からの脱励起光検出を示唆する実験結果を元に短期間での検出系システムのアップデートを行い、最終年度ではアイソマー準位からの脱励起 VUV 光の検出に成功、トリウム 229 アイソマーのエネルギーと寿命を決定するに至った。本研究では、他にもトリウム 229 をドーブしたフッ化カルシウム結晶標的の特性評価や、照射実験のバックグラウンドの評価なども行っており、これらの実験結果の情報をもとに VUV 光の精密観測へ向けた超伝導転移端検出器のデザインの最適化、および、検出系システムのアップデートを行い、今後さらなる実験感度の向上を目指す。VUV 光検出に特化した本検出系システムについては今後、原子核時計実用化へ向けて次のステップとなるトリウム 229 レーザー分光研究にも応用予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 S. Takatori et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Vacuum Ultraviolet Search from Thorium-229 Isomer in Crystal Toward Solid-State Nuclear Clock	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/efff/ifcs57587.2023.10272086	査読の有無 無
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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 高取沙悠理
2. 発表標題 固体原子核時計の実現へ向けた放射光X線を用いたトリウム229結晶の特性評価
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 高取沙悠理
2. 発表標題 原子核時計実現へ向けたXAFS法によるトリウム229をドーピングした結晶の特性評価研究
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高取沙悠理
2. 発表標題 XAFSを用いたトリウム229原子核時計候補結晶の評価および放射光X線を用いた原子核時計遷移の分光実験
3. 学会等名 第37回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Sayuri Takatori
2. 発表標題 Vacuum Ultraviolet Search from Thorium-229 Isomer in Crystal Toward Solid-State Nuclear Clock
3. 学会等名 2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sayuri Takatori
2. 発表標題 Characterization of Thorium-229 Crystal towards Vacuum Ultraviolet Search from Nuclear Clock isomer
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sayuri Takatori
2. 発表標題 Characterization of Thorium-229 doped crystals using synchrotron radiation X-rays toward an understanding the Thorium-229 isomer in solids
3. 学会等名 The 15th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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			
オーストリア	ウィーン工科大学			