



令和 8 年 8 月 21 日
岡山大学
科学技術振興機構 (JST)

レーザーで原子核の周辺環境を可視化 「固体原子核時計」を高精度化するレーザーメスバウアー法を実現

◆発表のポイント

- ・レーザーでトリウム 229 原子核のわずかなエネルギーの違いを読み取り、原子核の周囲の原子配列を明らかにする新手法を開発しました。
- ・フッ化カルシウム結晶中のトリウム 229 が存在する環境を 4 種類識別し、その特徴を明らかにしました。
- ・この手法はより高精度な固体原子核時計の早期実現に役立つとともに、原子核物理や物性物理と量子技術をつなぐ研究基盤となります。

岡山大学学術研究院先鋭研究領域（異分野基礎科学研究所）の平木貴宏助教（特任）、吉村浩司教授、吉見彰洋准教授、増田孝彦准教授、高取沙悠理日本学術振興会特別研究員 PD、岡井晃一助教（特任）（研究当時。現大阪大学／日本学術振興会特別研究員 PD）、オーストリア・ウィーン工科大学の Thorsten Schumm 教授らによる国際共同グループは、固体中のトリウム 229 原子核をレーザーで励起し、その周囲の局所環境（原子の並び方）を調べる「レーザーメスバウアー分光」法を開発しました。

メスバウアー分光は、物質の中で原子核がどのような環境にあるかを調べる強力な方法として、化学、地質学、物性物理学など幅広い分野で広く使われてきましたが、これまではガンマ線しか使えなかったため、大型装置・放射線源が必要でした。今回の研究では、特別に低いエネルギーで励起できる原子核として知られているトリウム 229 に着目し、真空紫外レーザーを用いたメスバウアー分光により、フッ化カルシウム結晶中に入ったトリウム 229 原子核のわずかなエネルギーの違いを詳しく観測しました。その結果、結晶中にはトリウム 229 が入り込むサイト（トリウム 229 を取り囲む原子の配置）が 4 種類あることを発見しました。さらに、それぞれの原子核の励起状態の寿命を調べ、主要な 2 種類のサイトについては実験データと理論計算を組み合わせることでトリウム 229 周囲の原子配列を推定しました。

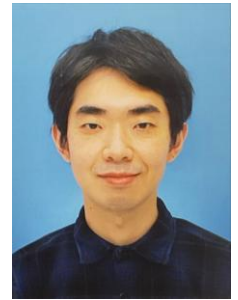
本成果は、極めて高精度な時計「原子核時計」、特に結晶を用いた固体原子核時計の設計に不可欠な情報を与えるものです。原子核時計は、現在の原子時計を超える精度を持つ次世代の時間標準として期待されており、物理定数の時間変化などの新しい物理の発見や革新的な計測技術につながる可能性があります。

本研究成果は、2026 年 8 月 20 日に米国の科学雑誌 *Science* に掲載されました。

PRESS RELEASE

◆研究者からのひとこと

トリウム 229 は、レーザーで直接操作できる可能性を持つ、非常に珍しい原子核です。今回、結晶の中でトリウム 229 がどのような場所に入り、どのように振る舞っているのかを、原子核自身をセンサーとして利用して調べることができました。高精度固体原子核時計の実現には、結晶の中の環境を理解することが欠かせません。今回の成果は、そのための大きな一歩です。国際共同研究チームで長年積み重ねてきた実験技術と解析が形になり、とてもうれしく思っています。



平木助教（特任）

■発表内容

<現状>

私たちが日常生活で使っている時刻は、原子の性質を利用した「原子時計」によって高い精度で支えられています。原子時計は、通信、GPS 測位、科学実験など、現代社会のさまざまな基盤技術に欠かせない存在です。

一方で、さらに高い精度を目指す次世代の時計として、「原子核時計」が注目されています。原子時計が原子の電子の遷移^(注1)を利用するのに対し、原子核時計は原子の中心にある原子核の遷移を利用します。特に原子番号 90 の元素トリウムの同位体^(注2)、トリウム 229 は、既知の原子核の中で例外的に低いエネルギーで励起できる原子核として知られており、レーザー^(注3)で直接励起できる唯一の原子核です。原子核は周囲の原子からの影響を受けにくいいため、周囲に多数の原子が存在する固体中にトリウム 229 を埋め込んだ状態でも時計として利用できます。

トリウム 229 原子核のレーザー励起は最近になって達成され、実際に原子核時計として利用できることが示されました。しかし、高精度な固体原子核時計を開発するには、トリウム 229 が結晶などの物質中でどのような環境に置かれ、その環境が原子核時計の性能にどのような影響を与えるのかを詳しく知る必要があります。

<研究成果の内容>

・全体の概要

本研究グループは、トリウム 229 を含むフッ化カルシウム結晶に真空紫外レーザー^(注4)を照射し、トリウム 229 原子核の低エネルギー遷移を直接調べました。これは、従来ガンマ線を用いて行われてきたメスバウアー分光^(注5)を、レーザーで到達できる光の領域に拡張するものです。

その結果、フッ化カルシウム結晶中には、トリウム 229 が存在する場所（サイト）が 4 種類あることを発見しました。さらに、それぞれの場所で原子核が感じる電場の特徴を測定し、主要な 2 種類については、実験データと理論計算を比較することで結晶中での微視的な構造を推定しました。

また、特定の場所にあるトリウム 229 だけを選んでレーザーで励起する「サイト選択的」な測定により、原子核の励起状態の寿命（どのくらい長く続くか）を調べました。加えて、別のレーザー照射によって励起状態が異なるチャンネルで基底状態に遷移して寿命が短くなる現象についても、場所ごとに評価しました。

これにより、結晶中のトリウム 229 原子核の周囲の環境を、原子核そのものを「探針（センサー）」として使って調べる新しい手法を実現しました。

PRESS RELEASE

・レーザーメスbauer分光について

結晶中のトリウム 229 は周囲の原子がもたらす電場に勾配がある場合、図 1 のように基底状態は 3 つ、励起状態は 2 つに分裂します。真空紫外レーザーの周波数を変えていったとき、基底状態と励起状態のエネルギー差とレーザーのエネルギー（周波数）が一致（共鳴）するとトリウム 229 原子核が励起されます。基底状態と励起状態の分裂の組み合わせにより共鳴する周波数は最大 6 つになります。分裂のエネルギーはトリウム 229 が入り込むサイトの周囲の環境に依存するため、分裂の大きさを調べることでトリウム 229 周囲の環境の情報を得ることができます。

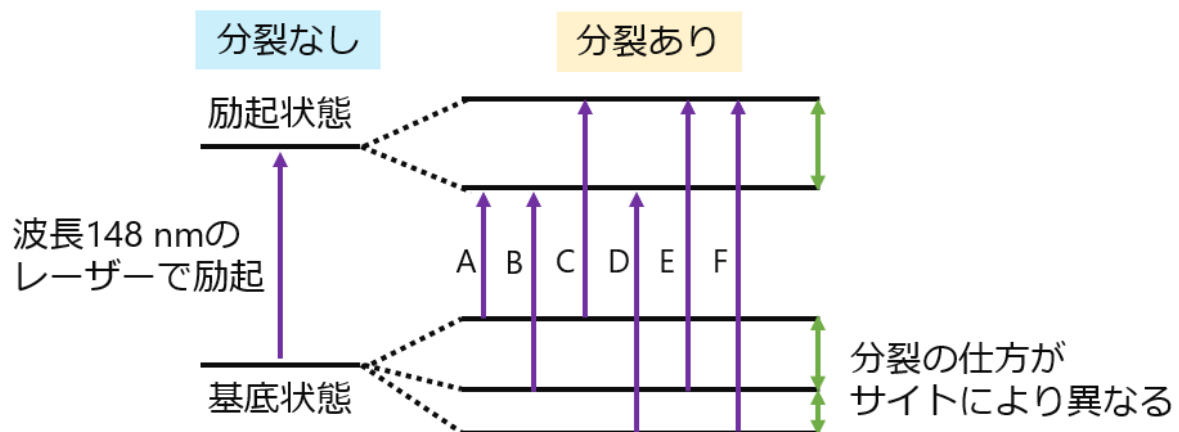


図 1 トリウム 229 原子核の基底状態と励起状態の分裂の様子

実験で得られたデータ（スペクトル）の例を図 2 に示します。多数のピークが観測されましたが、このデータをよく検討して解析することで分裂の仕方が異なるサイトが 4 つ存在することが初めて明らかになりました。また特徴としてサイト 1 と名付けたサイトは分裂が観測されず、サイト周囲の原子がもたらす電場勾配（周囲の原子による電氣的な影響）が非常に小さいことが分かりました。

・トリウム 229 原子核の励起状態の寿命

フッ化カルシウム結晶中のトリウム 229 原子核の励起状態の寿命は 10 分程度であることが以前の研究で知られていました。今回、結晶の種類やサイトを変えて寿命を測定し、条件を変えた場合でも寿命は大きく変わらず 630 秒程度であることが分かりました（図 3）。

一方、固体中のトリウム 229 原子核の励起状態の寿命は励起用のレーザーと別の波長のレーザーを照射すると短くなる（クエンチ）ことが知られていました。今回はトリウム 229 原子核を真空紫外レーザーで励起した後に青色のレーザーを照射し、照射中の寿命を測定しました。レーザー照射中の寿命は最も影響を受けるサイトでは約 1/6 に減少し、その減少率はサイトごとに大きく異なることが分かりました（図 4）。

PRESS RELEASE

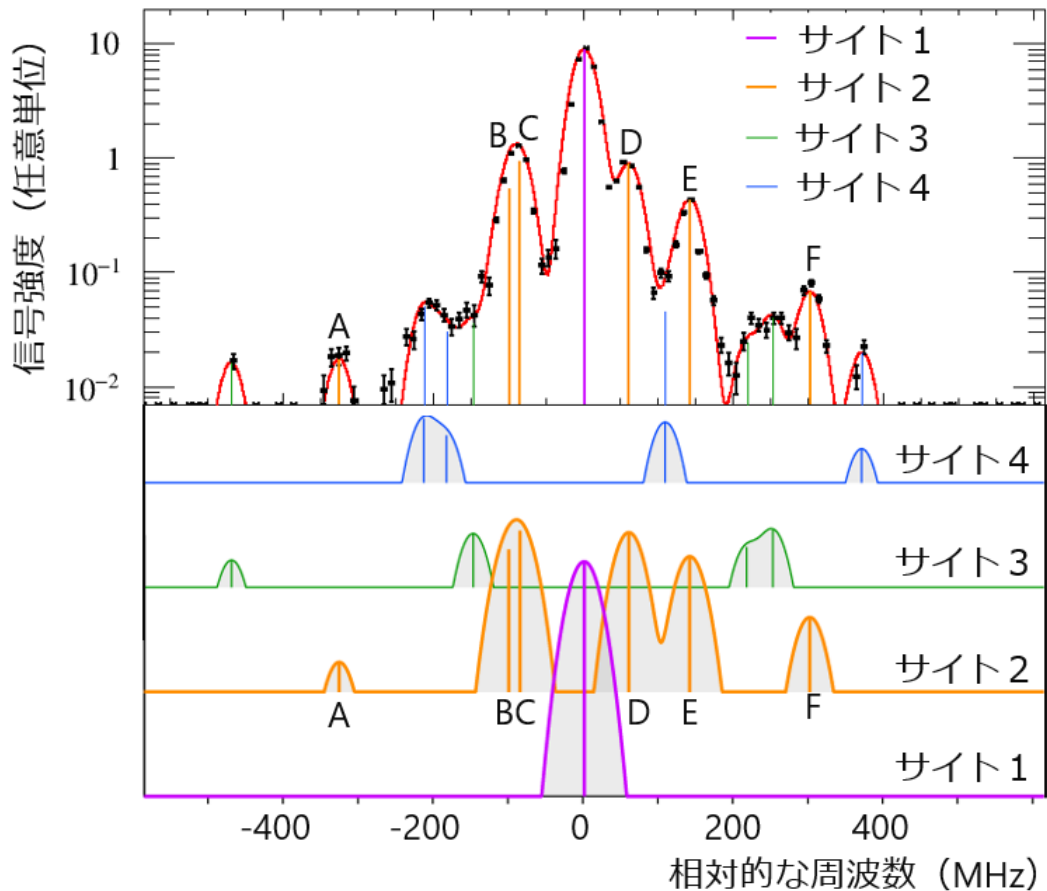


図2 周波数を変えながら取得した信号強度スペクトル

上図の黒の点がデータ、赤線が解析により再現したスペクトル。

サイト2では6本ある分裂線（A-F）をすべて観測することに成功した。

下図はトリウム 229 が入り込むサイトごとに分けたスペクトル。

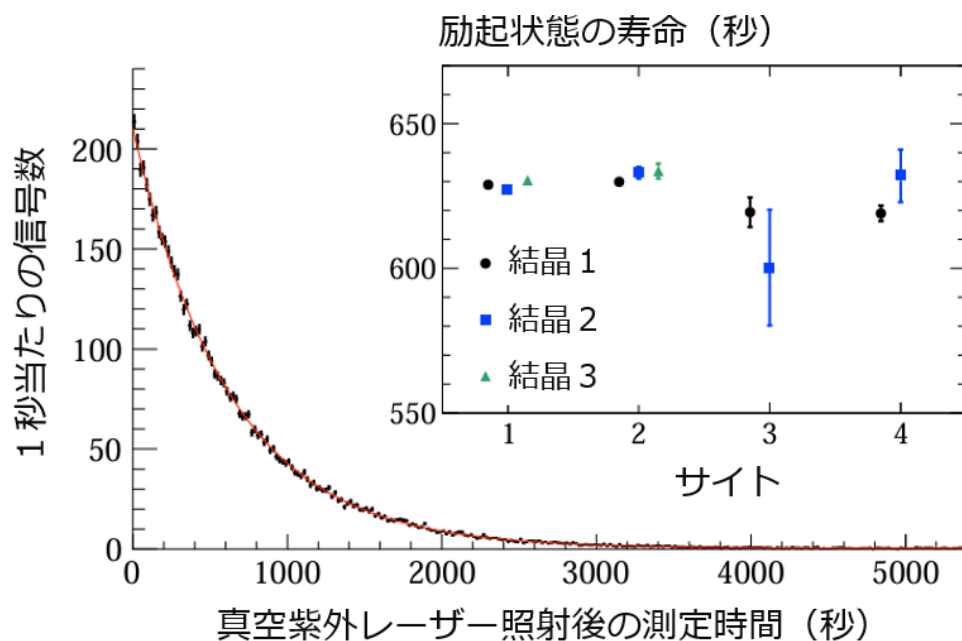


図3 トリウム 229 原子核の励起状態の寿命測定

右上に結晶の種類やサイトを変えた時の寿命をまとめている。

PRESS RELEASE

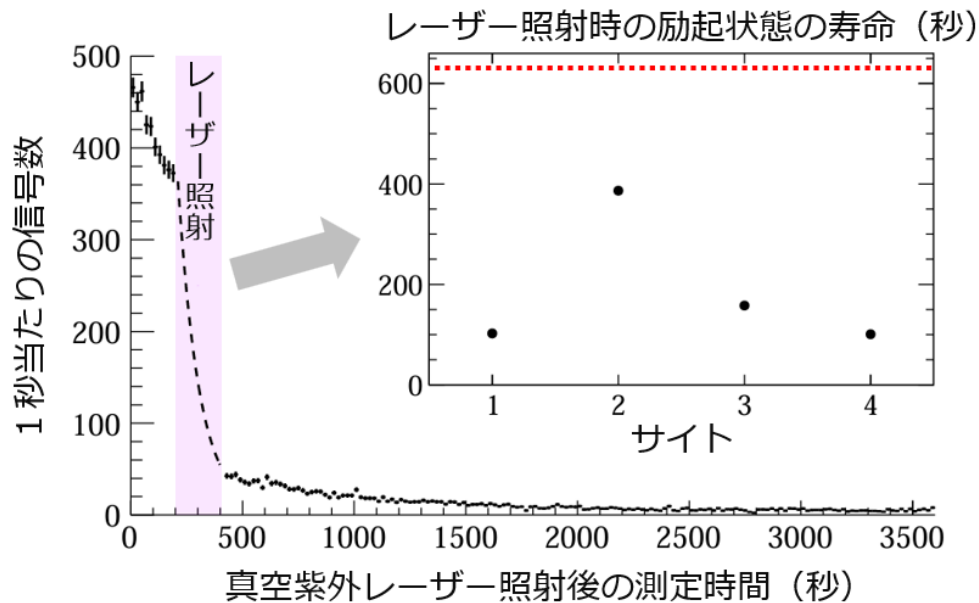


図4 トリウム 229 原子核のクエンチレーザー照射中の励起状態の寿命測定

右上にサイトを変えた時の寿命をまとめている。

右上の赤色の点線はクエンチが起きない場合の寿命を示している。

・トリウム 229 周囲の原子の配置

レーザーメスbauer分光実験で得られたスペクトルデータからサイトごとの電場勾配の情報が得られます。これらの情報を、トリウム周辺の原子構造についてさまざまな配置を仮定し、スーパーコンピュータで計算した電場勾配と比較して、実験で得られたものと合うものを選ぶことで信号強度の強いサイト1、サイト2についてトリウム 229 周囲の原子配置を提案しました。

図5がトリウム 229 (Th) を埋め込んだフッ化カルシウム (CaF₂) の原子配置を示したもので、サイト1 (左) ではトリウムは1つのカルシウムのいた場所に置換され入っています。この配置は対称的な構造をしているため、電場勾配が非常に小さくなります。一方サイト2 (右) では2つのトリウムが近い位置のカルシウムを置換して入っています。近くに複数のトリウムが入る構造は電子顕微鏡を用いた観察からもその存在が示唆されています。

このように、これまでは見えなかった原子核の周囲の環境が、原子核そのものを「探針(センサー)」として用いる「レーザーメスbauer分光」という新手法により、精密に読み解けるようになりました。今回行ったフッ化カルシウムを用いた結晶試料以外にもこの手法は適用可能で、新しい試料に対してレーザーメスbauer分光により複数のピークを発見し、サイトごとの特性を調べることで、より固体原子核時計に適した遷移を調べることができます。

PRESS RELEASE

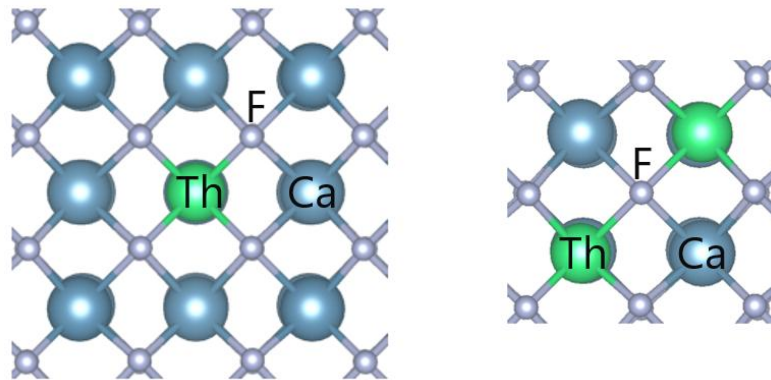


図5 トリウム 229 周囲の原子配置

左：サイト 1、右：サイト 2

Th: トリウム 229、Ca: カルシウム、F: フッ素

＜社会的な意義＞

本研究成果は、将来の固体原子核時計を設計するうえで重要な基盤情報を与えるものです。高精度でコンパクトな固体原子核時計が実現すれば、通信、GPS 測位、精密計測など幅広い技術の発展に貢献することが期待されます。また、原子核時計は、自然界の基本法則が本当に一定であるかを調べる研究や、未知の物理現象を探索する研究にも役立つ可能性があります。今後固体の原子核時計の高精度化を実現するためには、より高分解能なピークを持ち、周囲の影響を受けにくい結晶環境を見つけることが重要です。しかし、その候補を 1 つずつ調べるのは、これまで多くの時間が必要でした。今回実現したレーザーメスbauer分光法は、新しい試料に対して広い周波数範囲で一度に多数のピークを観測してそれぞれのサイトの情報を調べることを可能にし、高精度な固体原子核時計に適した結晶環境を発見するための新しい探索技術を提供します。この手法は固体原子核時計の高精度化を加速するだけでなく、原子核物理、物性物理、量子技術をつなぐ研究基盤になると考えられます。

今後は、得られた知見をもとに、より時計に適した結晶環境の探索や、トリウム 229 原子核の制御技術の高度化を進め、高精度固体原子核時計の実現を目指します。

■論文情報

論文名：Laser Mössbauer Spectroscopy of ^{229}Th in CaF_2

掲載誌：Science

著者：Takahiro Hiraki, Takahiko Masuda, Sayuri Takatori, Fabian Schaden,
Michael Bartokos, Kjeld Beeks, Yuta Fukunaga, Andreas Grüneis,
Ming Guan, Georgy Kazakov, Thomas LaGrange, Adrian Leitner,
Ira Morawetz, Ryoichiro Ogake, Koichi Okai, Martin Pimon,
Martin Pressler, Thomas Riebner, Noboru Sasao, Felix Schneider,
Thorsten Schumm, Kotaro Shimizu, Luca Toscani de Col, Tomas Sikorsky,
Akihiro Yoshimi, Koji Yoshimura



PRESS RELEASE

D O I : 10.1126/science.aea7978

U R L : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aea7978>

■研究資金

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業（JP21H04473, JP24K00646, JP24H00228, JP24KJ0168, JP25K17413）、二国間交流事業（120242002）、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST（JPMJCR24I6）、European Research Council（ERC）under the European Union's Horizon 2020 and Horizon Europe research and innovation programme（Grant Agreement No. 856415 and No. 101087184）、Austrian Science Fund（FWF）[Grant DOI: 10.55776/F1004, 10.55776/J4834, 10.55776/PIN9526523]、Schweizerischer Nationalfonds（SNF）fund 514788 の支援を受けて実施しました。

■補足・用語説明

注 1. 遷移

量子力学においては、原子や原子核はとびとびのエネルギー状態を持ちます。一番低いエネルギー状態を基底状態と呼びます。基底状態に光などでエネルギーを与える（励起）ことで基底状態とは異なる状態（励起状態）に移り、この過程を遷移と呼びます。励起状態は時間経過によりエネルギーを放出して基底状態に戻ります。基底状態に戻るまでの平均的な時間は寿命と呼ばれます。原子時計や原子核時計は光の周波数を寿命の長い遷移を用いて安定化させて時間の基準を作ります。

注 2. 同位体

原子核は陽子と中性子から構成されます。陽子数は同じであるが中性子数が異なる元素のことを同位体と呼びます。トリウムの中でもトリウム 229（陽子数 90、中性子数 139）だけが例外的に低いエネルギーで励起できる原子核を持っています。

注 3. レーザー

通常の光とは異なり、指向性（光がまっすぐ進む性質）や単色性（光の波長がそろっている性質）を持つ光をレーザーと呼びます。

注 4. 真空紫外レーザー

トリウム 229 原子核を励起するには波長が 148 nm のレーザーが必要です。この波長は可視光より波長の短い紫外領域の光ですがその中でも真空紫外領域と呼ばれる空气中を透過しない波長です。この実験では波長変換と呼ばれる技術を用いることで別の波長のレーザーから波長 148 nm の真空紫外レーザーを生成しています。



PRESS RELEASE

注 5. メスバウアー分光

原子核が特定のエネルギーの光を吸収・放出する現象を利用して、その原子核の周囲の環境を調べる方法です。物質の構造解析に広く利用されています。通常原子核を励起するためには波長の短いエックス線やガンマ線と呼ばれる光が必要ですが、トリウム 229 原子核の場合 148 nm の光が励起波長で、この波長のレーザーは実験室で作成することが可能で、更に光の波長の絶対値の精密測定や精密制御が可能なため、これまで調べるのが難しかった固体中の原子核の性質を調べる新しい研究手法として利用されることも期待されます。

<お問い合わせ>

【JST事業に関するお問い合わせ】

科学技術振興機構 戦略研究推進部

グリーンイノベーショングループ

金山晋司

(電話番号) 03-3512-3531

(メール) crest@jst.go.jp

(報道対応窓口)

科学技術振興機構 広報課

(電話番号) 03-5214-8404

(メール) jstkoho@jst.go.jp



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY



岡山大学は持続可能な開発目標 (SDGs) を支援しています。

