

新物理に高感度な原子遷移の精密分光に成功

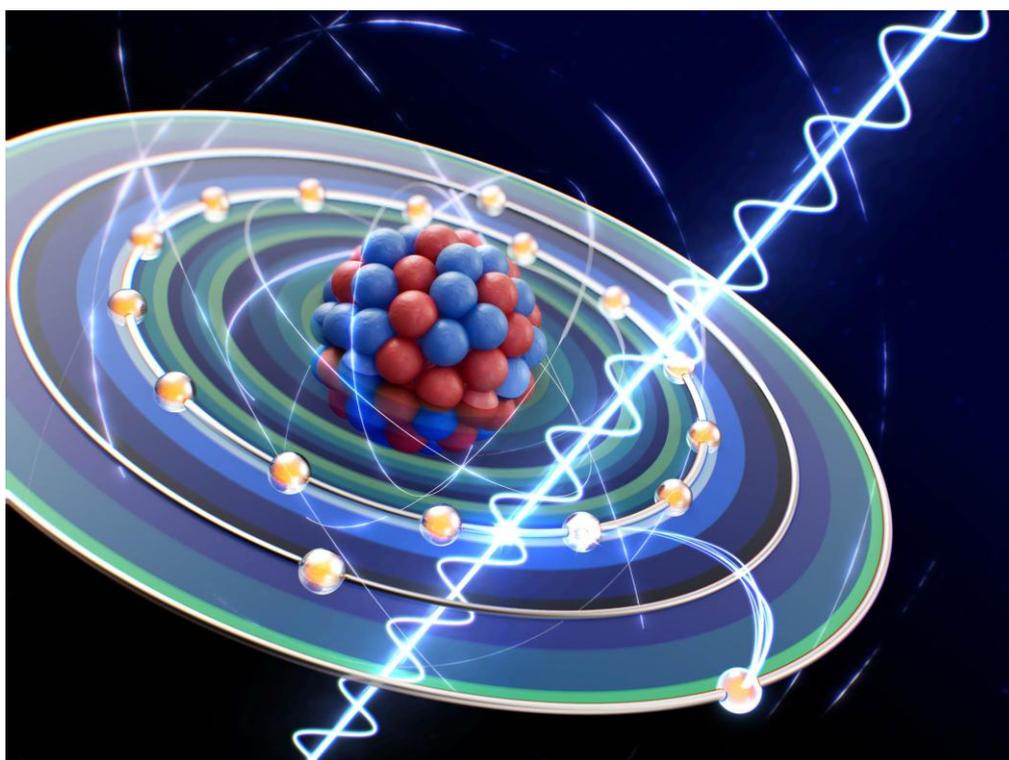
—既存の物理を超える未知の現象を探すための新たなツール—

概要

現代物理学には、宇宙の全エネルギーの約95%を占めるダークマター・ダークエネルギーの正体が分からないなど、大きな謎が残されています。この謎を解くために、既存の物理学（標準模型^{*1}）を超える新物理の探索が世界中で進められています。

京都大学大学院理学研究科の石山泰樹 博士課程学生、小野滉貴 同准教授、高野哲至 同特定准教授（白眉センター）、高橋義朗 同教授らの研究グループは、中性イッテルビウム原子の内殻電子が励起される遷移に注目しました。この遷移は、超軽量ダークマターや局所ローレンツ不変性^{*2}の破れなどの新物理現象に高い感度を持つことが理論的に予想されています。研究グループは、イッテルビウム原子を光格子と呼ばれる光のかごで捕捉し、高度に安定化されたレーザー光を照射することで、約2桁の精度改善を実現しました。さらに、この遷移を用いた新物理探索の第一歩として、同位体シフトを測定し、電子と中性子の間の新しい力に関する解析を行いました。本研究は、既存の物理学では説明できない未知の現象の高精度探索への道を切り開く重要な成果です。

この成果は、2026年3月20日午前10時（ロンドン時間）に英国の国際学術誌「*Nature Photonics*」にオンライン掲載されました。



イッテルビウム原子の「内側」の電子にレーザー光を照射し、励起する様子。

©京都大学

1. 背景

標準模型とその問題点

これまで観測された素粒子・宇宙物理学実験のほとんどは、標準模型^{*1}と呼ばれる理論モデルで説明することができます。一方で、宇宙の全エネルギーのうち標準模型が説明できるのはたった 5%ほどで、残りはダークマター・ダークエネルギーと呼ばれる未知の存在です。これに代表されるように標準模型では説明できない現象が存在することから、標準模型を超える「新物理」があると考えられていますが、いまだその詳細は謎に包まれています。

光格子時計を用いた新物理探索実験

微小な新物理の兆候を捉えるため、世界で最も精密な「物差し」である光格子時計^{*3}が活用されてきました。これは、光格子というレーザー光で作った「光のかご」の中に原子を捕まえ、電子の状態が変わる（遷移する）際のエネルギーを極めて精密に測る装置です。その精度は 19 桁にまで達し、あらゆる物理量測定の中で最高の精度を誇ります。しかし、従来の光格子時計には弱点がありました。測定精度は極めて高い一方で、肝心の「新物理」を敏感に感じ取る能力（感度）が低い遷移を利用していたのです。

イッテルビウム原子の「内側」の電子に注目

そこで私たちは、中性イッテルビウム (Yb) 原子の「内殻電子」が励起される特殊な遷移 $4f^{14}6s^2\ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2\ (J=2)$ 遷移に注目しました (図 2)。通常の光格子時計が原子の「外側」の電子を使うのに対し、この遷移では原子の「内側」にある電子を動かします。このユニークな特徴により、超軽量ダークマターや局所ローレンツ不変性^{*2}の破れなどの新物理現象に高い感度を持つことが理論的に予見されています。私たちは 2023 年にこの遷移の初観測に成功し、その後複数の研究グループが追随しましたが、測定の分解能（スペクトル線幅）が足りず、光格子時計や新物理探索に求められる精度には数桁及んでいませんでした。

2. 研究手法・成果

精密分光

私たちは、図 3(a)の実験装置を用いて、先行研究と比較して約 2 桁の線幅改善に成功しました。まず、レーザー光を 6 方向から照射して光格子を作り、イッテルビウム原子を 3 次元の格子状に整列させました。これにより、原子の熱運動によるスペクトルの拡がり大幅に抑制されます。この際、2つのエネルギー状態に対して光の器の深さを全く同じにする「魔法波長」のレーザー光を使用することで、トラップ用の光が測定結果に与える影響を排除することが鍵です。このように捕獲されたイッテルビウム原子に対して、高度に安定化された青色レーザー光を照射することで、図 3(b)のような鋭いスペクトルの観測に成功しました。得られたスペクトルの線幅（細さ）は約 80 Hz であり、これは先行研究の精度を約 2 桁上回る画期的な結果です。これにより、「高精度」かつ「新物理に高感度」な光格子時計実現に向けて大きく前進しました。

「第五の力」探索に向けた同位体シフト測定

さらに、私たちが実証した精密分光の有用性を実証するため、「同位体シフト」の測定を行いました。原子番号が同じで中性子の数だけが異なる同位体の間では、遷移エネルギーがわずかに変化します。この変化（同位体シフト）を極めて精密に調べることで、現代物理学の 4 つの力（重力・電磁気力・強い力・弱い力）に続く、電子・中性子間の「第五の力」とも呼ぶべき未知の相互作用の正体に迫ることができると期待されています。私たちは、同位体シフトを 9 桁という極めて高い精度で測定し、このデータ及び相対論に基づく計算値を用いて新物理に関する情報を得るための「キングプロット」解析を行うことで、いくつかの仮定のもとでの新物理に対する制限を与えました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、新物理に敏感な光格子時計構築に向けた大きな進展です。将来的にこの内殻電子を用いた光格子時計が完成すれば、従来の感度を大幅に上回る新物理探索実験が可能になります。これにより、いまだ謎に包まれているダークマターの正体解明など、宇宙の根本に迫る成果が期待されます。本研究の成果は、新物理の探索にとどまりません。近年、中性原子の内部自由度を活用した量子コンピュータや量子シミュレーションが盛んに研究されており、私たちの成果はこれらの幅広い量子技術へも展開可能です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業(No. JP17H06138, No. JP18H05405, No. JP18H05228, No. JP21H01014, No. JP22K20356, No. 24K16995, No. 24KJ1347, No. 24K07018)、科学技術振興機構(JST) さきがけ(No. JPMJPR23F5)、JST CREST(No. JPMJCR1673, JPMJCR23I3)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP(No. JPMXS0118069021)、JST ムーンショット型研究開発事業(No. JPMJMS2268, JPMJMS2269)の助成を受けて行われました。本研究は、JST 先端国際共同研究推進事業(No. JPMJAP24C2)の支援を受け、本事業で目指す Yb 原子型量子計算機の開発に向けて、日本側チームは超狭線幅光学遷移を利用した量子操作の開発の役割を担っており、その研究から本成果につながりました。小野は、京都大学理学研究科 銀楓ファンドからの支援に感謝いたします。砂賀は、JSPS 科研費(No. 21K14643)からの資金援助に感謝いたします。山本の研究は、台湾の国家科学及技術委員会教育部(高等教育深耕計画 NTU-112L104022)、および台湾国立理論科学センター(NCTS)の支援を受けました。また、本研究の一部には、京都大学学術情報メディアセンター(ACCMS)のスーパーコンピュータ、および九州大学情報基盤研究センターの一般利用課題として提供された計算リソースを使用しました。

<用語解説>

※1 **標準模型**：素粒子物理学の理論モデルで、電磁気力、強い力、弱い力と呼ばれる3つの基本相互作用を記述する。重力を記述する一般相対性理論と合わせて、多くの素粒子・宇宙物理学の実験結果を説明することができる。

※2 **局所ローレンツ不変性**：「物理法則は、実験装置の向きや速度に関係なく常に同じである」というアインシュタインの相対性理論の根幹をなす原理の一つ。もしこの不変性が破れていれば、「宇宙には特定の方向性がある」ことを意味し、現代物理学の常識を覆すことになる。標準模型と一般相対性理論を統合する量子重力理論は、この不変性の破れている可能性を予見しており、その検証が試みられている。

※3 **光格子時計**：対向するレーザー光の干渉によって形成される光格子トラップに捕獲された原子に光を当て、吸収された光の振動数(共鳴周波数)を精密に測定して1秒の長さを決める時計。現在その測定精度は19桁にまで達しており、次世代の「秒の定義」の最有力候補である。

<研究者のコメント>

既存の物理学に挑戦する『新物理』の探索は、現代科学の最前線です。本研究では、理論的に高い感度が予見されながらも精密測定が実現されていなかった内殻遷移に着目し、そのボトルネックを数年越しの実験によって打破しました。今回の成果が、将来の物理学のさらなる発展に繋がることを期待しています。(石山泰樹)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Orders-of-magnitude improvement in precision spectroscopy of an inner-shell orbital clock transition in neutral ytterbium (中性イッテルビウム原子の内殻電子時計遷移の精密分光における数桁の改善)

著者：Taiki Ishiyama, Koki Ono, Hokuto Kawase, Tetsushi Takano, Reiji Asano, Ayaki Sunaga, Yasuhiro Yamamoto, Minoru Tanaka, and Yoshiro Takahashi

掲載誌：Nature Photonics DOI：10.1038/s41566-026-01857-8

<参考図表>

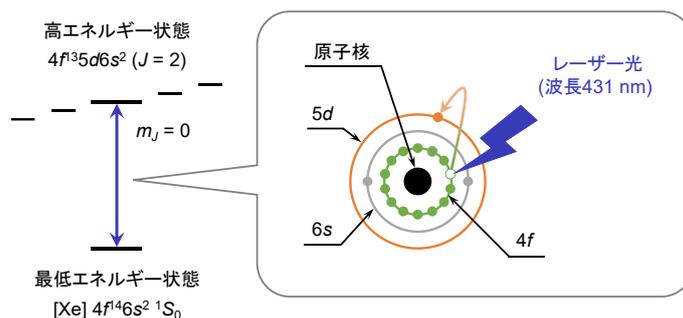


図2：イッテルビウム原子の「内殻電子」を用いた遷移。本研究では、内側の電子(4f)が外側(5d)に変化する遷移を、波長431 nmの青色レーザー光を用いて分光する。

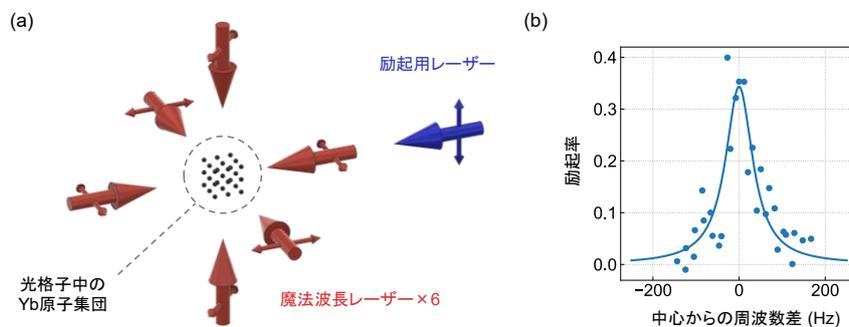


図3：精密分光。(a) 光格子中にイッテルビウム原子を捕捉し、励起用レーザー光を照射する。(b) 典型的なスペクトル。線幅は77(11) Hzで、先行研究から2桁の精度改善に成功した。