

内殻電子が励起する時計遷移の初観測に成功

— 新奇な光格子時計を用いた超高感度な新物理探索へ —

概要

現在の素粒子物理学では、標準模型^{*1}という理論モデルで宇宙の数多くの現象を説明・記述できることが知られています。一方で宇宙の全エネルギーのうち約95%が標準模型では説明できない（暗黒物質・暗黒エネルギー問題）などの未解決問題を抱えているため、標準模型を超える新物理の探索実験が世界各国で精力的に進められています。その一つに、光格子時計^{*2}と呼ばれる中性原子の精密分光技術を用いた実験があります。

石山泰樹 理学研究科博士課程学生、小野滉貴 同特定助教、高野哲至 同特定准教授、砂賀彩光 同特定研究員、高橋義朗 同教授らの研究グループは、イッテルビウム原子の内殻電子が励起される時計遷移^{*3}（波長 431 nm）に注目し、世界初となる直接観測に成功しました。さらに、将来の光格子時計構築の鍵となる魔法波長^{*4}の探索や励起状態の寿命測定なども行いました。この遷移は、内殻軌道の電子が励起するという特長により、超軽量暗黒物質などいくつかの新物理現象に高い感度を持つことが理論的に予測されているため、光格子時計として活用することで超高感度な新物理探索実験が可能になると期待されます。

本成果は、2023年4月15日に米国の国際学術誌「*Physical Review Letters*」にオンライン掲載されました。

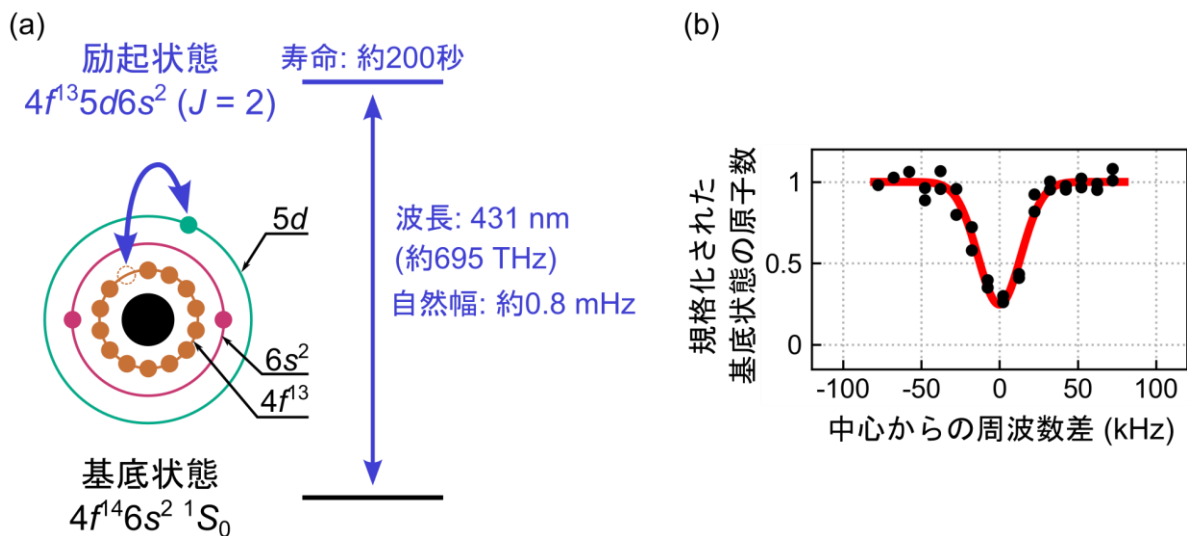


図 1: 本研究の概要図。(a) イッテルビウム原子の 431 nm 時計遷移。特定の周波数の光を照射すると、電子が内殻 4f 軌道からより高エネルギーな外殻 5d 軌道に励起される。(b) 本研究で達成した世界初の 431 nm 遷移分光。中心での基底状態原子数の減少は、その分だけ原子が励起状態に励起されたことを意味している。現状のスペクトル線幅約 30 kHz は原理限界である自然幅約 0.8 mHz と比べると太く、その改善が今後の課題である。

1. 背景

宇宙の大部分を占めている暗黒物質や暗黒エネルギーは、どうすれば観測できるでしょうか？宇宙に行ったり、望遠鏡を覗いたりしなくても、我々が実現した「内殻電子が励起する時計遷移を用いた光格子時計」を用いれば、観測できるかもしれません。

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、標準模型と呼ばれる素粒子物理学理論モデルでよく記述・説明できることが知られています。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、残りは暗黒物質（約26%）や暗黒エネルギー（約69%）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いくつか存在することから、標準模型を超える新物理の存在が指摘されています。現在まで、粒子を超高エネルギーまで加速して衝突させる高エネルギー加速器実験から、低エネルギーでの精密測定実験まで、数多くの新物理探索実験が行われてきましたが、いまだ新物理の詳細は明らかになっていません。

光格子時計を用いた新物理探索実験

後者の精密測定技術のうち、最も高い測定精度を誇るのが原子の共鳴周波数計測です。その実装方法の一つに光格子時計があります。光格子時計とは、中性原子を、光格子と呼ばれる対向するレーザー光で形成される定在波ポテンシャルでトラップし、その超狭線幅光学遷移（時計遷移）の遷移周波数を高精度に測定する精密測定技術です。現在光格子時計の精度は18桁にまで達しており、あらゆる物理量の測定の中で最高の精度を誇ります。

このような超高精度な光格子時計は、新物理による微小なエネルギー変化を検出できると考えられており、以下のような新物理現象の探索実験が提案・実証されてきました。

- ① 超軽量暗黒物質：暗黒物質のなかでも電子質量の 10^{-20} 倍ほどのとても軽い暗黒物質。
- ② 局所ローレンツ不変性の破れ：「全ての実験結果は実験装置の向きと速度に依存しない」ということを意味する基礎物理法則の仮定の1つが破れていること。
- ③ 電子・中性子間の新奇な相互作用：電磁気力、強い力、弱い力、重力からなる4つの基本相互作用以外の新奇な相互作用。

光格子時計で新物理現象を探索するには、感度の異なる2つの光格子時計の周波数を比較する必要があります。従来の光格子時計に加え、より新物理現象に高感度な光格子時計の構築が期待されていました。

2. 研究手法・成果

そこで私たちは、新たな時計遷移として、中性イッテルビウム (Yb) 原子の $4f^{14}6s^2 \ ^1S_0 \leftrightarrow 4f^{13}5d6s^2$ ($J=2$) 遷移に注目しました (図1(a))。この遷移は波長が431 nmで、スペクトル線幅の原理限界（自然幅）が約0.8 mHzの超狭線幅遷移であると計算されており、光格子時計構築に適した遷移です。さらにこの遷移は、従来光格子時計に用いられてきた時計遷移に比べて先述の新物理現象①-③に非常に高い感度を持つことが理論的に示されているため、新物理探索に有望であると言えます。

世界初の431 nm 遷移観測

私たちは最初に、この431 nm 遷移の探索を行いました。まず、レーザー光を駆使してイッテルビウム原子集団をマイクロケルビン以下の極低温まで冷却し、光双極子トラップ^{*5}で捕捉します。そして、波長431 nmの狭線幅励起光レーザーを照射し、基底状態の原子数を観測します。図1(b)はその実験結果です。ある特定の周波数で基底状態の原子数が減少していることが分かり、これは基底状態の原子が励起レーザー光によって

励起されたことを示しています。これは世界初の 431 nm 時計遷移の観測です。また、本研究では中心周波数から幅約 30 kHz にわたり原子数ロスが観測されました。これは理論から予測される自然幅 0.8 mHz より広いですが、これは原子集団の速度分布拡がりや励起光のレーザー線幅が原因だと考えられます。今後は光格子中に原子を閉じ込め、さらに線幅を狭窄化したレーザーを用いることで自然幅に近い分光の実現を目指します。

魔法波長の決定

次に私たちは、将来の光格子時計構築に不可欠な魔法波長の探索を行いました。魔法波長とは、原子遷移をなす 2 状態に対して同じ光格子深さを与える特殊な波長のことで、魔法波長のレーザー光で光格子を形成することで、光格子トラップによる共鳴周波数シフトを大きく抑制することができます。これが光格子時計が高精度を誇る秘訣です。私たちは（励起光とは別の）レーザー光を原子集団に照射している条件下で波長 431nm の遷移周波数の変化を観察しました。その結果、波長 797 nm、833 nm 近傍でトラップ用レーザー光のパワーを変化させても遷移周波数シフトがなくなることを発見しました（図 2）。この結果は、これらの波長が魔法波長であり、光格子時計の構築が可能であることを意味します。なお、測定の前に、スパコンを用いた相対論的電子相関計算に基づいて魔法波長を推定することで、実験にかかる労力を削減しました。

励起状態の寿命測定

さらに、励起状態の寿命測定も行いました。スペクトル線幅の原理限界である自然幅は、励起状態の寿命に反比例するため、寿命が長ければ長いほど狭線幅な、つまりより精密な分光が可能になります。私たちは、3 次元光格子中で励起状態をトラップし、どのくらいの時間励起状態の原子がトラップ中に存在し続けるかを調べることで、寿命の下限値を 1.9(1)秒と定めることに成功しました。現状は私たちの実験装置の問題が測定値を制限してしまっていますが、それでもこの値は既存の光格子時計に匹敵する値であり、将来の光格子時計構築が可能であることを示す重要な結果です。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、431 nm 時計遷移の世界初観測に成功し、新たな光格子時計構築に向けた第一歩となりました。この遷移は複数の新物理現象に高い感度を持つため、光格子時計の構築に成功した暁には、従来感度を大幅に上回る新物理探索実験が可能になります。今後私たちは、光格子時計の構築とそれを用いた①-③の新物理探索実験を計画しています。最終的には、既存の制限を大幅に上回る精度で新物理を探索し、その正体に迫りたいと考えています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科学研究費育成事業 (JP17H06138、JP18H05405、JP18H05228、JP22K20356)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR1673)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP (JPMXS0118069021)、JST ムーンショット型研究開発事業 グラント番号 JPMJMS2269、京都大学理学研究科プログラム銀楓ファンドの助成を受けて行われました。理論計算は、文部科学省科学研究費補助金 若手研究 (21K14643) の支援を受け、九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムの一般利用を使用しました。

<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 **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18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。

※3 **時計遷移**：光格子時計で周波数測定される超狭線幅光学遷移。ここで超狭線幅とは、スペクトル線幅の原理限界である自然幅が非常に小さいことを意味する。

※4 **魔法波長**：原子遷移をなす基底・励起状態に対して、同じ光格子深さを与える特殊な波長。魔法波長のレーザー光で光格子を形成することで、光格子トラップによる共鳴周波数の変化を大幅に抑制することができる。

※5 **光双極子トラップ**：原子に対して非共鳴な高強度レーザー光を照射し、その集光点に原子集団をトラップする手法。

<研究者のコメント>

近年、量子コンピュータに代表される量子技術が注目を集めています。本研究は、超高感度な「新物理探索のための量子センサー」開発に向けた第一歩に位置づけられます。近年盛んに研究が行われている競争の激しい分野ですが、世界に先駆けてこのような成果を発表できたことを嬉しく思います。（石山泰樹）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Observation of an Inner-Shell Orbital Clock Transition in Neutral Ytterbium Atoms

（中性イッテルビウム原子の内殻軌道時計遷移の観測）

著者：Taiki Ishiyama, Koki Ono, Tetsushi Takano, Ayaki Sunaga, and Yoshiro Takahashi

掲載誌：*Physical Review Letters*

DOI：10.1103/PhysRevLett.130.153402

<参考図表>

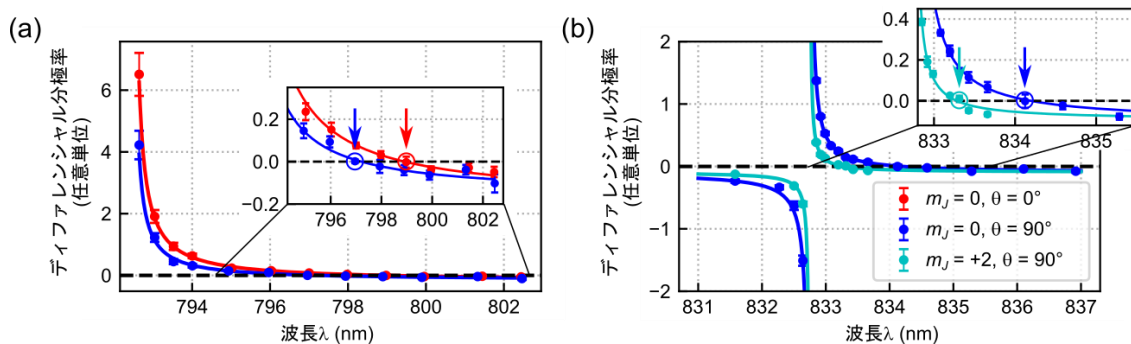


図 2: 魔法波長探索の実験結果。縦軸のディファレンシャル分極率は、波長 λ のレーザー光によって生じる周波数シフトに対応しており、それがゼロになるのが魔法波長である（拡大図に矢印で示している）。

m_J は励起状態の磁気副準位を、 θ はレーザー光の偏光と量子化軸のなす角度を表している。

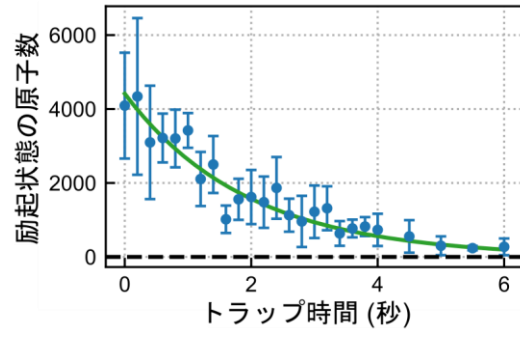


図 3: 励起状態の寿命測定。フィッティングから、その下限値を 1.9(1)秒と定めることに成功した。