

最小エネルギーをもつトリウム 229 アイソマー状態の人工的生成——原子核時計の実現に向けて

増田 孝彦 <岡山大学異分野基礎科学研究所 masuda@okayama-u.ac.jp>

吉見 彰洋 <岡山大学異分野基礎科学研究所 yoshimi@okayama-u.ac.jp>

山口 敦史 <理化学研究所, JST さきがけ atsushi.yamaguchi.fv@riken.jp>

吉村 浩司 <岡山大学異分野基礎科学研究所 yosimura@okayama-u.ac.jp>

自然界で存在が確認されている約3,000種類ある原子核の中で最小の励起エネルギーをもつものは何か？ 答えは原子番号90のトリウムの同位体、トリウム 229である。そのエネルギーはわずか約8.3 eVで、2番手のウラン 235 (約80 eV) を大きく引き離して断トツである。

この特異にエネルギーの低い原子核状態(準安定状態≡アイソマー状態)が、最近、注目を集めている。原子核の中で唯一、レーザーで励起できる可能性があるからである。原子核は周囲を電子で覆われているため、その遮蔽効果により外場の影響を受けにくい。レーザー操作により、精密で安定な量子状態を作り出すことが可能となる。

トリウム 229 アイソマー状態の応用として最も期待されているのが「原子核時計」である。最先端の原子時計を上回る精度を達成できる可能性があり、様々な分野への応用が期待されている。基礎物理分野においては、究極の時間測定を通して、物理定数の経年変化の検証、新しい手法での暗黒物質の探索等、物理探求のプラットフォームとして注目を集めつつある。

このように特異なアイソマー状態が存在することは40年以上も前から知られていたが、長年の研究にもかかわらず、これまでレーザー励起に成功した例はない。エネルギーや寿命の不確か性が大きく、その測定に必要なアイソマー状態を人工的に生成する手段がなかったからである。しかしながら、その状況は、ここ数年で大きく変わりつつある。2016年にドイツのグループがアイソマー状態からの電子を放出する遷移を初めて観測したのを皮切りに、複数の

実験結果が報告され、エネルギー精度が一気に向上した。そして、筆者らのグループがアイソマー状態を人工的に生成することに初めて成功したのである。

ここで目指したのは、アイソマー状態を基底状態から直接励起するのではなく、すでにエネルギーがある程度わかっている第2励起状態(29.19 keV)を経由して、アイソマー状態へ遷移させる方法である。第2励起状態への励起には、放射光施設(SPring-8)の高輝度X線を利用し、励起の確認には核共鳴散乱の手法を用いる。一見容易に思えるが、実際には第2励起状態の寿命が極端に短く(~100 ps)かつ遷移強度が微弱であるということもあり、予想をはるかに超える困難が待ち受けていた。それでも、放射光ビーム、核共鳴散乱、放射化学、原子物理、角度計測の各分野の専門家の方々に協力を仰ぎつつ、一步一步前進を続けて、ついに、第2励起状態の核共鳴散乱を観測し、そのエネルギーと寿命を精密に測定することに成功した。苦節5年、オールジャパンの力を結集したワンチームによる成果である。これにより、入射X線のエネルギーを共鳴付近でわずかに変化させるだけで、アイソマー状態の生成をON/OFFすることが可能となり、アイソマー状態を大量かつ自在に生成する手段を手に入れることができたことになる。

今回の成果はまだ「原子核時計」への第1歩を踏み出しただけに過ぎない。ここで得られたアイソマー状態生成法を有効に利用して、アイソマー状態からの脱励起光を観測し、世界に先駆けてレーザー励起、そして原子核時計の実現を目指していく。

用語解説

原子時計と原子核時計：

2つのエネルギー準位間の遷移によって吸収される光やマイクロ波の周波数が正確で安定なことを利用し、その遷移周波数を基準にして発振器の周波数を制御し安定化した時計のこと。原子核は電子の雲で遮蔽されているため、原子核遷移の周波数を基準とする原子核時計の精度は、環境変化の影響を受けにくいと考えられている。

物理定数の経年変化：

永久に変わることがないと考えられている物理定数(例えば、微細構造定数)が宇宙史のスケールでは変化する可能性が指摘されている。標準理論を超える枠組みでは物理定数の変化を予言するものもあり、宇宙の加速膨張との関連も議論されている。

核共鳴散乱：

原子核が励起状態のエネルギーと一致した γ 線やX線等の光を吸収して励起状態に遷移(共鳴励起)した後、一定の時間を経て、 γ 線、内部転換電子、あるいは特性X線を放出して、元の状態に戻るような散乱過程。超高分解能でのエネルギー分光が可能となり、物性、原子核研究に利用されている。(表紙も参照)

