

カドミウム光格子時計の魔法波長を決定

—室温で 18 桁の精度を持つ小型・可搬型光格子時計の実現に道筋—

理化学研究所（理研）開拓研究本部香取量子計測研究室の山口敦史研究員、香取秀俊主任研究員らの国際共同研究グループは、カドミウム原子を用いた「光格子時計」の「魔法波長」を実験的に決定しました。本研究成果は、室温で 18 桁の精度を持つ小型・可搬型光格子時計の実現につながる重要な成果です。

今回、国際共同研究グループは、カドミウム原子を光格子に捕獲し、光格子レーザーによる光シフトを精密に測定しました。その結果、光シフトがゼロになる光格子レーザーの波長（魔法波長）を、 419.88 ± 0.14 ナノメートル（nm、1nm は 10 億分の 1 メートル）と決定しました（図 1）。さらに、この結果をもとに、カドミウム光格子時計の黒体放射シフトを理論的に見積もったところ、既に実現されているストロンチウム原子やイッテルビウム原子の光格子時計と比べて、室温で 1 桁程度小さいことが分かりました。これにより、カドミウム光格子時計が、室温で 18 桁の精度を持つ小型・可搬型光格子時計を実現する有力な候補であることが明らかになりました。

本研究は、9 月 14 日に米国の科学雑誌『Physical Review Letters』のオンライン版に掲載された。

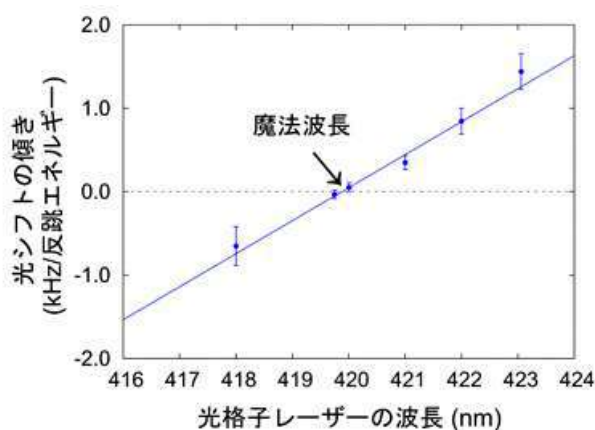


図 1 カドミウム光格子時計の魔法波長を 419.88 ± 0.14 nm と決定

背景

「原子時計」とは、原子が選択的に吸収する電磁波の周波数を基準に作られる時計です。現在の世界の 1 秒は、セシウム原子が吸収する 9.2GHz の電磁波の周波数を基準に作られた、精度およそ 16 桁の原子時計で定義されています。

「光格子時計」は、2001年に東京大学大学院工学系研究科の香取秀俊助教授（当時）が提案した原子時計の手法の一つです。光格子時計では、レーザー光を干渉させてできる干渉縞（光格子）に原子を閉じ込め、その原子が吸収する光の周波数を測定します。このとき通常は、光格子レーザーの影響で、原子が吸収する光の周波数が変わってしまいます（光シフト）。しかし、「魔法波長」と呼ばれる特別な波長のレーザーで光格子を作ると、光シフトがゼロになります。すると、原子が静止しかつ周囲に電磁場が存在しない孤立状態のときに吸収する光の周波数と同じ周波数を、光格子中でも測定できるようになります。さらに、光格子に閉じ込められた多数の原子を一気に観測することで、この周波数測定を短時間に精度良くできるのも、光格子時計の大きな利点です。

国際共同研究グループは、カドミウム原子を使った光格子時計の実現を目指して研究を進めてきました。既に実現されているストロンチウム原子やイッテルビウム原子の光格子時計では、原子の周辺環境から放射される黒体放射による周波数シフト(黒体放射シフト)を抑えるために、冷凍機を使った低温環境を用意し、その中で実験を行うことで18桁の精度を達成しました。これに対して、カドミウム原子は、黒体放射シフトが極めて小さく、そのような複雑な装置を用意しなくても、室温のシンプルで小型な装置で同じレベルの精度が実現できると期待されています。そのため、光格子時計を実現する上で必須のパラメータである魔法波長の実験的な決定が待たれていました。しかし、カドミウム光格子時計を実現するためには、開発の非常に難しい深紫外波長のレーザー光源を多数用意する必要があるため、今までほとんど研究が行われてきませんでした。

研究手法と成果

カドミウム原子の魔法波長を決定するためには、光シフトを測定し、それがゼロとなる光格子レーザーの波長を探します。そのためには、まずレーザー冷却によりカドミウム原子の熱運動を小さくし、光格子に捕獲する必要があります（図2）。研究チームは、そのために開発した深紫外波長のレーザー冷却光源を使い、カドミウム原子の熱運動を、温度に換算して6マイクロケルビン（ μK 、 $1\mu\text{K}$ は100万分の1ケルビン）にまで小さくしました。

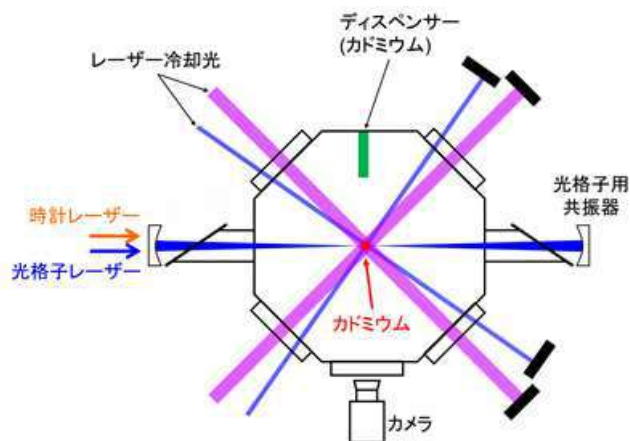


図2 カドミウム原子の魔法波長を決定するために開発した装置の概念図

次に、こうして熱運動を小さくしたカドミウム原子を光格子に捕獲し、光シフトを調べました。光格子レーザーの波長が魔法波長になると、その強度が変わっても、原子が吸収する光の周波数は変わりません。実験でそのような波長を調べ（図3）、魔法波長を 419.88 ± 0.14 ナノメートル (nm, 1nm は 10 億分の 1 メートル) と決定しました。さらに、理論的にも魔法波長を計算し、 $420.1 \pm 0.7 \text{nm}$ という実験結果と矛盾しない結果を得ました。

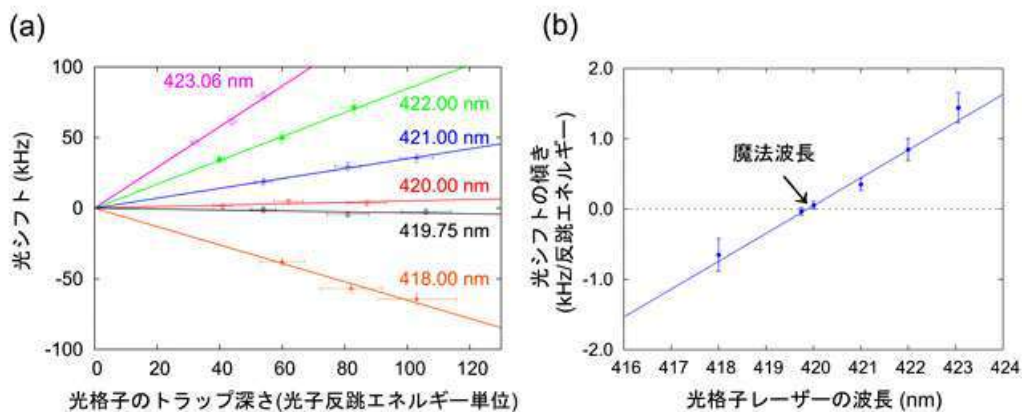


図3 魔法波長の決定

(a) 光シフトの光格子レーザーの波長およびトラップ深さ(横軸) 依存性。トラップ深さは、光格子レーザーの強度に比例する量。図中の数字は光格子レーザーの波長を表す。
 (b) 光シフトの傾きの波長依存性。(a)の六つの波長での光シフトの傾きを、光格子レーザーの波長でプロットしたもの。縦軸がゼロになる（光シフトが光強度で変化しなくなる）波長が魔法波長であり、 $419.88 \pm 0.14 \text{nm}$ と決定された。

以上の実験結果に基づいて、カドミウム光格子時計の黒体放射シフトを理論的に計算した結果、ストロンチウム原子やイッテルビウム原子の光格子時計の黒体放射シフトより1桁小さいことが確認されました。これは、室温付近で温度が0.1°C揺らいでも、時計の精度が19桁目でしか揺らがないことを意味します。これにより、室温で18桁の精度を持つ原子時計として、カドミウム光格子時計が有力な候補であることを明らかにしました。

今後の期待

今回の研究では、カドミウム光格子時計にとって最も重要なパラメータである魔法波長を実験的に決定しました。これにより、カドミウム光格子時計の実現に向け道筋をつけることができました。

さらに、既に実現されているストロンチウム原子やイッテルビウム原子の光格子時計と比べて、カドミウム光格子時計は黒体放射に対する影響が1桁程度小さいことを明らかにしました。黒体放射の影響が大きい光格子時計では、冷凍機を使い低温環境を用意することで黒体放射シフトを抑制しています。カドミウム光格子時計なら、そのような複雑な装置を使わなくても、室温のシンプルで小型な実験系で、同じ精度の光格子時計を実現できる可能性があります。

そのような小型・可搬型の光格子時計は、例えば、近年活発に研究が行われている、重力ポテンシャルの変化を原子時計の周波数変化として検出する、相対論測地学[7]と呼ばれる分野の強力な計測ツールとしての応用が期待できます。

日文新聞发布全文 http://www.riken.jp/pr/press/2019/20190914_1/

文：JST 客观日本编辑部翻译整理