

香取量子計測研究室 (2019)

主任研究員 香取 秀俊 (D.Eng.)



(0) 研究分野

分科会: 物理、工学

キーワード: 量子エレクトロニクス、原子時計、量子計測、光格子時計、相対論的測地学

(1) 研究背景と研究目標

原子スペクトル計測の極限的精度の追求は、量子力学の誕生や現代物理学の発展に大きく貢献してきた。この成果として実現される高精度原子時計は、GPSによる測位や超高速大容量通信ネットワークのタイミング制御など、現代生活を支える基幹技術となっている。我々は2001年に新たな原子時計手法「光格子時計」の概念を提案した。これが実現すれば、原理的には1秒の計測時間で18桁の精度で時間計測が可能になる。このような人類未踏の領域での高精度周波数比較をツールとして、基礎物理定数の恒常性の検証、相対論的な時空の歪みを測地学へ応用する相対論的測地学など、最先端の時間計測に基づく基礎物理の探究とその工学的応用を目指す。これと並行して「光格子時計」をプラットフォームとした、量子フィードバック手法の検討や量子シュミレータ・コンピュータの研究、また、固体原子デバイス（アトムチップ）や原子核時計の開発など、極低温原子を用いる量子情報技術、量子計測の研究を展開する。

(2) 2019年度成果と今後の研究計画(中長期計画2025年度まで)

1. カドミウム光格子時計の魔法波長を決定

光格子時計の不確かさを制限する主因の1つに原子の周辺環境から放射される黒体輻射による周波数シフト(黒体輻射シフト)がある。既に実現されている光格子時計では、冷凍機などを使い低温環境を用意し、その中で時計遷移(光格子時計が周波数を参照する原子遷移)の分光を行うことで黒体輻射シフトを抑制し、18桁の精度を達成した。黒体輻射シフトを抑えるもう1つの方法は、黒体輻射に対する感度の小さな原子を用いることである。その1つがカドミウムである。しかし、カドミウム原子は、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が測定されておらず、その実験的な決定が待たれていた。

本研究では2019年度、このカドミウムの魔法波長を実験的に決定した。光格子時計のスキームでは、ドップラーシフトを抑えるため、原子を光格子にトラップし空間的に強く束縛する。このとき、トラップに使う光格子レーザーによって引き起こされる周波数シフト(光シフトと呼ばれる)が、ゼロになる光格子レーザーの波長が魔法波長である。カドミウム原子を光格子ポテンシャルに捕獲するため、本研究ではまず、カドミウム原子の熱運動をレーザー冷却の手法を使い6 μ Kに冷却した(光格子ポテンシャルの深さは50 μ K程度)。そうして冷却したカドミウム原子を光格子ポテンシャルに輸送し、光シフトを調べた。光格子レーザーの波長が魔法波長になると、光格子レーザーの強度が変わっても、光シフトは変わらない。実験でそのような波長を調べ、魔法波長を419.88(14) nmと決定した(図1)。また理論的にも魔法波長を計算し、420.1(7) nm と実験結果と矛盾しない結果を得た。

今後は、カドミウム光格子時計がどの程度の精度を実現できるか、検証を進める。

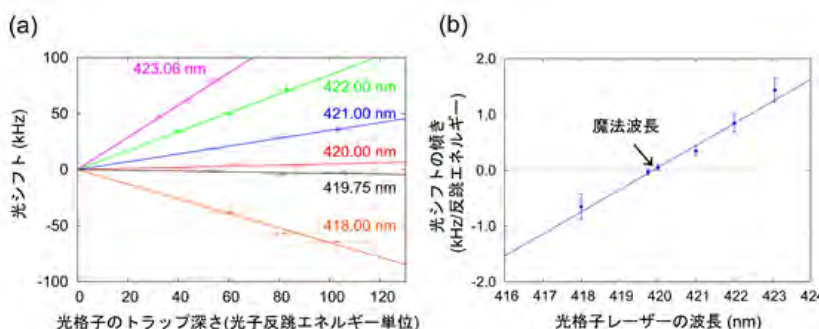


図1 カドミウム光格子時計の魔法波長の決定 (a) 光シフトの光格子レーザーの波長およびトラップ深さ依存性. 図中の数字は光格子レーザーの波長を表す. (b) 光シフトの傾きの波長依存性. 縦軸がゼロになる波長が魔法波長であり、419.88±0.14 nmと決定された。

2. トリウム229アイソマー状態のエネルギーを決定

トリウム229の原子核は、励起エネルギーがわずか数 eVの準安定状態(アイソマー状態, 寿命~1000 秒)を持つ. このアイソマー状態は、現在で知られている中では唯一、レーザーで分光が可能な原子核であり近年注目を集めている. その応用として、基底状態からアイソマー状態への遷移周波数を基準とする原子核時計などが期待されている.

しかし、2018年までに報告されていたアイソマー状態のエネルギー値は、実験グループの間で一致していなかった. その値のばらつきは分光用レーザーをつくるには大きすぎ、トリウム229原子核のレーザー分光も実現されてこなかった. そのため、アイソマー状態のエネルギーの新たな測定が待たれていた.

本研究では今年度、独自に開発した超伝導遷移端センサーと呼ばれるエネルギー分解能の高いガンマ線分光器を用いて、トリウム229原子核から放射されるガンマ線のエネルギーを精密に測定し、アイソマー状態のエネルギーを8.30(92) eV と決定した. この値は、2019年に異なる実験手法で測定された、他の2つの実験グループによる測定値と不確かさの範囲内で一致した.

今後は、エネルギー8.30 eVのレーザーを使ったトリウム229原子核の精密レーザー分光の実現を目指し、トリウム229のトラップ装置の開発をすすめる.

(3) 研究室メンバー

(2019年度)

(主任研究員)

香取秀俊

(専任研究員)

高本将男

(研究員)

大前宣昭、山口敦史

(研修生)

高橋忠宏、水嶋玲、村井亮太、原田直輝、
畠山康一郎、市川弘貴、山野新一郎、

Yo Shota

(アシスタント)

小林恵

(4) 発表論文等

1. “Narrow-line Cooling and Determination of the Magic Wavelength of Cd”, A. Yamaguchi, M. S. Safronova, K. Gibble, and H. Katori, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 113201 (2019).
2. “Superradiance from lattice-confined atoms inside hollow core fibre”, S. Okaba, D. Yu, L. Vincetti, F. Benabid, and H. Katori, *Commun. Phys.* **2**, 136 (2019).
3. “Energy of the ^{229}Th Nuclear Clock Isomer Determined by Absolute g-ray Energy Difference”, A. Yamaguchi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 222501 (2019).
4. “X-ray pumping of the ^{229}Th nuclear clock isomer”, T. Masuda *et al.*, *Nature* **573**, 238 (2019).

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/research/labs/chief/qtm_metrol/index.html

<http://www.amo.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>