

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740281

研究課題名(和文)デュアル光格子時計を用いた、黒体放射の影響を受けない合成時計周波数の実証

研究課題名(英文) Demonstration of a synthetic frequency immune to the blackbody radiation shift with a dual optical lattice clock system

研究代表者

赤松 大輔(Daisuke, Akamatsu)

独立行政法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：90549883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光格子時計における最大不確かさ要因である黒体放射による周波数比シフトを回避するために、同時に二台の光格子時計が稼働可能なシステムを開発することを目的とした。同一の真空容器においてSrおよびYbの同時磁気光学トラップに成功し、それぞれの魔法波長による光格子に導入することに成功した。さらにそれぞれの時計遷移の観測にも成功した。

研究成果の概要(英文)：To reduce the frequency uncertainty due to the blackbody radiation, we aimed to develop a system, in which two optical lattice clocks of Sr and Yb can be operated simultaneously. In this research, we successfully magneto-optically trapped two atomic species of Sr and Yb simultaneously and loaded them into optical lattices at each magic wavelength. We also successfully observed the clock transitions of Sr and Yb.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：光格子時計 黒体放射 精密計測 光周波数コム

1. 研究開始当初の背景

東京大学の香取により考案された**光格子時計**は、現在の秒の定義であるセシウム原子時計を上回る性能を示しており、次世代の秒の標準器として期待されている。光格子時計とは、時計遷移の遷移周波数を変化させない波長(魔法波長)のレーザーによる定在波中に多数個の原子を光トラップすることで、ドップラシフトや衝突シフトなどの不確かさを要因を低減し、高精度な周波数基準を実現する方法である。香取らによる2005年の実証実験以降、各国の研究機関で精力的に研究が進められている。研究開始当初には、1000sで 1×10^{-17} の周波数安定度が実証されていた。しかしながら、その周波数基準としての正確さ(精度)は、黒体放射の不確かさ要因により制限され、おおよそ 1×10^{-16} 程度にとどまっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、異種原子を用いた光格子時計を同一の黒体放射場中(同一の真空槽中)で実現し、二つの時計周波数より実現される合成時計周波数が黒体放射場の影響を受けないことを実験的に明らかにすることである。そして、光格子時計の最大の不確かさ要因である黒体放射の影響を回避する新たな方法を実証することに挑戦する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、二つの光格子時計を一つの真空槽中で同時に実現する「デュアル光格子時計」という新しい実験システムを構築する。そして、デュアル光格子時計に安定化した二つの時計レーザーの周波数により実現される合成周波数が真空槽の温度により変化しないことを実験的に示す。実験に用いる原子種としては、(研究開発当初にすでに実績があった)SrおよびYbを用いる事にした。

4. 研究成果

本研究では、**デュアル光格子時計**を実現する過程で、主に以下の研究成果が得られた。

(1) 「線幅転送」の手法を利用したSrおよびYb光格子時計の時計レーザーの開発

「線幅転送」の手法を利用したSr及びYb原子の時計遷移を励起する時計レーザー(Sr; 698 nm / Yb; 578 nm)の開発に成功した。非常に狭い線幅である時計遷移にアクセスするための時計レーザーの線幅は数 Hz 程度でなければならない。通常 Hi-Finesse 共振器を利用し、時計レーザーの線幅の狭窄化を行う。時計レーザーの波長が異なれば、それぞれの波長に対する Hi-Finesse 共振器を用意しなければならない。本研究では、スピーディーに研究を遂行するため「光周波数コムによる線幅転送」を利用した時計レーザーの開発を行った。

本研究では、研究実施機関である産業技術総合研究所に既存の**狭線幅光周波数コム**を利用した。狭線幅光周波数コムとは、ULE 共振器に安定化された超狭線幅レーザーを周波数基準として用いる事で、光周波数コムのすべての周波数モードの線幅が狭窄化されているような光周波数コムの事である。本研究では、それぞれの時計遷移に共鳴する波長で発振する外部共振器半導体レーザーを自作し、狭線幅光周波数コムに位相同期することで、3-4 Hz の線幅を持つ時計レーザーの開発に成功した。このようなシステムでは、二台の時計レーザーの周波数ノイズは共通の超狭線幅レーザーに由来するため、後述する研究成果(3)のような周波数比較を行う実験において短期的なレーザーノイズをキャンセルすることが可能である。

(2) 線幅転送手法によるSr光格子時計の絶対周波数計測

(1)の研究成果で実現された時計レーザーを利用して、Sr光格子時計の絶対周波数計測を行った。測定された周波数値は 429 338 004 229 872.0 (1.6) Hz であり、相対不確かさは 3.7×10^{-15} であった。絶対周波数計測の精度は主に、用いた周波数基準である UTC(NMIJ) で制限されていた。また、各種の実験条件から見積もられる光格子時計自身の不確かさは 3.8×10^{-16} であった。

本研究成果は、査読付き英文誌である *Applied Physics Express* にて出版され、2015 年に開催予定の時間周波数の諮問委員会を通じて国際度量衡委員会に報告され、周波数勧告値の改訂に貢献する予定である。

(3) Sr/Yb光格子時計を用いた精密時計遷移周波数比計測

本研究で実現した Sr 光格子時計と産総研に既存の Yb 光格子時計を同時駆動し、二つの時計遷移周波数の周波数比計測を行った。周波数比計測は、現在の周波数基準によらない測定であるため、それぞれの絶対周波数計測により導かれる周波数比の不確かさよりも小さい不確かさで測定することが可能である。実験により求められた周波数比の値は 1.207 507 039 343 341 2(17) であり、相対不確かさは 1.4×10^{-15} であった。これは絶対周波数計測により決定された値と互いの不確かさの範囲内で一致した。本測定にかかった時間は、およそ3時間であり、絶対周波数計測を利用した場合に比べ、およそ1/10の時間で同程度の不確かさの結果を得ることに成功した。

本研究成果は、査読付き英文誌である *Optics Express* にて出版され、2015 年に開催予定の時間周波数の諮問委員会を通じて国際度量衡委員会に報告される予定である。

(4) 同一真空容器中での Sr/Yb 原子集団の同時磁気光学トラップ

デュアル光格子時計を実現するためには、同一真空槽中で二つの原子種を同時に磁気光学トラップする必要があります。

共通の原子オープンから射出された熱原子に対し、同時に Sr および Yb 原子の第一次冷却に必要なレーザー光を照射し、許容遷移 ($^1S_0-^1P_1$) を用いた磁気光学トラップを行った。各種の実験条件を調整することで、それぞれ 1.4×10^5 (Sr) 5.2×10^5 (Yb) 個の原子を同時に磁気光学トラップすることに成功した。この実験では、Yb のレーザー冷却光 (399nm) による Sr のイオン化による原子ロスが観測された。

第一次冷却された原子集団をさらに冷却をするため禁制遷移 ($^1S_0-^3P_1$) によるレーザー冷却、および磁気光学トラップを行った。捕獲された原子数は、ともにおよそ 3×10^4 程度であり、温度は 15uK であった。二種類のアルカリ土類金属の禁制遷移を用いた同時磁気光学トラップの報告はこれまでされておらず、本研究により世界で初めて実現された成果である(図1)。

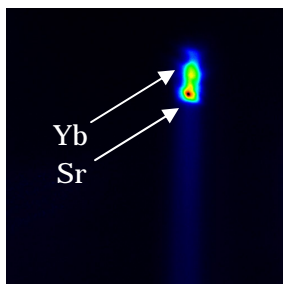


図1：禁制遷移を用いた同時磁気光学トラップ

(5) 同一真空容器中における Sr/Yb 原子集団の魔法波長による同時光トラップ

(4) で得られた成果を元に、同一真空容器中における Sr/Yb 原子集団の魔法波長による同時磁気光学トラップを行った。魔法波長の光による光トラップでは、それぞれの時計遷移周波数に影響を与えずに原子集団の捕獲が可能である。しかしながら、魔法波長は、それぞれの原子で異なる (Sr; 813 nm / Yb; 759 nm) ため、お互いの光トラップのビームが異なる原子に照射されないようにする必要があり、本研究では、ねじれの関係にあるように光トラップ用の光を入射し、原子集団を捕獲することに成功した(図2)。

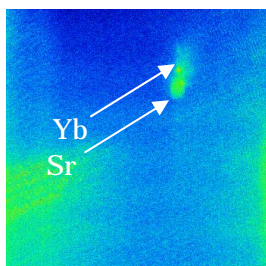


図2：同時に光格子中にトラップされた Sr と Yb 原子集団

さらに、このような位置にトラップされたそれぞれの原子集団に対し時計レーザーを入射し、それぞれの時計遷移を観測することにも成功した(図3)。

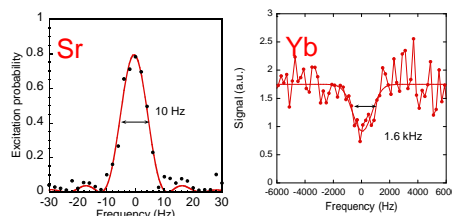


図3：観測された時計遷移(左：Sr、右：Yb)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

D. Akamatsu, H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, A. Onae, T. Suzuyama, M. Amemiya, and F.-L. Hong, "Spectroscopy and frequency measurement of the 87Sr clock transition by laser linewidth transfer using an optical frequency comb", Applied Physics Express, 査読有, Vol.7, 2014, 012401-1-4, DOI:10.7567/APEX.7.012401

D. Akamatsu, M. Yasuda, H. Inaba, K. Hosaka, T. Tanabe, A. Onae, and F.-L. Hong, "Frequency ratio measurement of 171Yb and 87Sr optical lattice clocks", Optics Express, 査読有, Vol.22, 2014, 7898-7905, DOI:10.1364/OE.22.007898

H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, Y. Nakajima, K. Iwakuni, D. Akamatsu, S. Okubo, T. Kohno, A. Onae, and F.-L. Hong, "Spectroscopy of 171Yb in an optical lattice based on laser linewidth transfer using a narrow linewidth frequency comb", Optics Express, 査読有, Vol.21, 2013, 7891-7896, DOI:10.1364/OE.21.007891

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, and Feng-Lei Hong, "Improved Absolute Frequency Measurement of the 171Yb Optical Lattice Clock towards a Candidate for the Redefinition of the Second", Applied Physics Express, 査読有, Vol.5, 2012, 102401-1-3, DOI:10.1143/APEX.5.102401

Daisuke Akamatsu, Yoshiaki Nakajima, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Masami

Yasuda, Atsushi Onae, ¥ and Feng-Lei Hong, "Narrow linewidth laser system realized by linewidth transfer using a fiber-based frequency comb for the magneto-optical trapping of strontium", Optics Express, 査読有, Vol.20, 2012, 16010-16016, DOI:10.1364/OE.20.016010

[学会発表](計9件)

D. Akamatsu, M. Yasuda, T. Tanabe, S. Okubo, H. Inaba, K. Hosaka, A. Onae, F. -L. Hong, "Present status of the Yb/Sr dual optical lattice clock at NMIJ", 2014 NMIJ-KRISS-ECNU Workshop on Time and Frequency, 2014年12月01日~2014年12月01日, AIST Tokyo Waterfront Annex, 東京

D. Akamatsu, M. Yasuda, H. Inaba, K. Hosaka, S. Okubo, T. Tanabe, A. Onae, F. -L. Hong, "Dual species intercombination MOT of 171Yb and 87Sr: Toward a dual optical lattice clock", The 24th International Conference on Atomic Physics (ICAP2014), 2014年8月3日~2014年8月8日, Mayflower Renaissance Hotel, Washington, D.C., 米国

赤松大輔、安田正美、稲場肇、保坂一元、大久保章、田邊健彦、大苗敦、洪鋒雷, "異種原子光格子時計を用いた時計遷移周波数比の精密計測", 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年09月28日, 徳島大学(徳島県徳島市)

Daisuke Akamatsu, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Takehiko Tanabe, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, "Measurement of optical frequency ratio with Sr and Yb optical lattice clocks", International Conference on Laser Spectroscopy 2013(ICOLS2013), 2013年6月9日, Claremont Hotel, Berkeley, 米国

赤松大輔、安田正美、稲場肇、保坂一元、田邊健彦、大苗敦、洪鋒雷, "異種原子光格子時計を用いた時計遷移周波数比の精密計測", 日本物理学会第68回年次大会, 2013年03月26日~2013年03月29日, 広島県、広島大学

Daisuke Akamatsu, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda, Takehiko Tanabe, Atsushi Onae and Feng-Lei Hong, "Precise measurement of the frequency ratio between Yb and Sr clock transitions", Workshop on the Optical Frequency Standards, 2013年02月07日~2013年02月07日, 東京都、(独)情報通信研究機構(小金井)

Daisuke Akamatsu, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Masami Yasuda,

Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, and Feng-Lei Hong, "Realization of a Sr optical lattice clock - Towards a Sr/Yb dual optical lattice clock", 5th International Workshop on Ultracold Group II Atoms (招待講演), 2012年10月10日~2012年10月12日, 東京都、(独)情報通信研究機構(小金井)

D. Akamatsu, H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, A. Onae, T. Suzuyama, M. Amemiya, and F.-L. Hong, "Precise measurement of the frequency ratio between Yb and Sr clock transitions", Workshop on Optical Comb, Clock, and Related Devices, 2012年10月03日~2012年10月03日, 茨城県、(独)産業技術総合研究所(つくば中央)

赤松大輔、稲場肇、安田正美、保坂一元、大苗敦、洪鋒雷, "線幅転送を利用したSr光格子時計の時計遷移の観測", 日本物理学会2012年秋季大会, 2012年09月18日~2012年09月21日, 神奈川県、横浜国立大学

[その他]

ホームページ等

<https://www.nmi.j.jp/~time-freq/wavelgt-std/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤松 大輔 (AKAMATSU, Daisuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計測標準総合センター物理計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：90549883