

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800231

研究課題名(和文) in-situ温度測定によるイッテルビウム光格子時計の高精度化

研究課題名(英文) Improvement of Yb optical lattice clock by in-situ measurement of temperature around the atoms

研究代表者

田邊 健彦 (Tanabe, Takehiko)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究員

研究者番号：30613989

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：イッテルビウム(Yb)光格子時計の不確かさの一つは黒体輻射に起因する。これは原子周辺の温度測定の不確かさが大きいことによる。この不確かさを低減のために、本研究は時計遷移の上準位とリユードベリ状態間の遷移周波数測定による温度測定を目的として、以下の成果を得た。(1)第一段磁気光学トラップ中のYb原子数増加のために、大強度かつ周波数ロックが堅牢な光源を開発した。(2)Yb原子の許容遷移の絶対周波数測定を行った。(3)ストロンチウム(Sr)光格子時計による本研究の遂行を検討した。それにはSr光格子時計の精度を上げる必要があったため絶対周波数測定を行った。測定法を工夫し前回の約3倍の高精度化に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the uncertainty due to the blackbody radiation in the ytterbium (Yb) optical lattice clock, we tried to measure the transition frequency between the upper state of clock transition and the Rydberg states in Yb atoms and obtained the following results: (1) We have developed the high-power and tightly frequency stabilized light source at 399 nm to increase the number of Yb atoms in magneto-optical trap. (2) We have performed the absolute frequency measurement of the dipole allowed transition in Yb atoms at 399 nm using optical frequency comb. (3) We have discussed the possibility of carrying out the present study using strontium (Sr) optical lattice clocks. For this purpose, further improvements of the Sr optical lattice clock were needed. Therefore we have performed the absolute frequency measurement of the Sr optical lattice clock and have succeeded in improving our Sr optical lattice clock, reducing the final uncertainty to 1/3 of that of our previous measurement.

研究分野：原子分子物理学

キーワード：光格子時計 絶対周波数測定 光周波数コム 秒の再定義

1. 研究開始当初の背景

原子の光領域にある遷移(数百 THz) を用いる「光周波数標準」の研究が、国内外の研究機関で盛んに行われている。特に「光格子時計」はその研究の中心を占める。これは2001年に東京大学の香取らが提案し、同じく香取らがストロンチウム(Sr)原子を用いて実証したこの新しい方式の原子時計であり、現在、最先端のセシウム原子時計の性能を上回る光格子時計も報告されている。光格子時計は次世代のSI秒の定義の有力の一つと目されている。光格子時計は、時計遷移の下準位(基底状態, 1S_0)と上準位(励起状態, 3P_0)の光シフトを相殺する波長(魔法波長)のレーザー光により作られた光格子中に捕獲された多数の中性原子の時計遷移を基準とする原子時計である。これにより、(i) ラム・ディック束縛によるドップラーシフトの除去、(ii) 長時間観察することによるQ値の増大、(iii) 多数個の原子の観察によるS/N比の増大、など、原子時計に必要な性能を高い次元で両立可能である。

本研究グループでは、イッテルビウム(Yb)原子を用いた光格子時計の開発に取り組み、2009年、世界で初めて ^{171}Yb の時計遷移($6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$, 波長578 nm)の遷移周波数を測定した(518 THz, 不確かさ 5.4×10^{-14})。2012年には、時計遷移周波数値の不確かさを、従来の10分の1以下の 3.9×10^{-15} にまで低減することに成功した。そして、2012年9月に行われた国際度量衡局(BIPM)傘下の時間周波数諮問委員会において、本研究グループによる2回の測定結果と、米国のNISTグループによる測定結果を基にした議論の末、 ^{171}Yb の時計遷移周波数値は、秒の再定義の際の候補である「秒の二次表現」に採択されるに至った。

現在の光格子時計における最も大きな不確かさ要因は、原子を取り囲む“環境”からの黒体輻射(Blackbody radiation, 以下 BBR)による、時計遷移の上・下準位のACシュタルクシフト(以下 BBRシフト)である。BBRシフト量は、原子を取り囲む環境温度の4乗に比例する。本研究グループのYb光格子時計においても、室温におけるBBRシフトによる不確かさは 2.0×10^{-16} (0.10 Hz)と、他の要因による不確かさに対して大きな値を持つ。その一因として、環境温度の測定の不確かさが大きいことが挙げられる。通常、BBRシフト量とその不確かさは、真空槽の外に取り付けた温度計の位置の温度を、仮想的に原子を取り囲む環境温度と見なして計算により求める。しかしこの方法には、(i) 温度計の不確かさが大きいこと、(ii) 真空槽内部の原子が存在する“その場”の温度を測定しているわけではない、という問題がある。仮に不確かさの小さい温度計を用いても、(ii)の原子の“そ

の場”の温度測定は実際には困難なため、上記の問題の本質的な解決は困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Yb原子の時計遷移の上準位と n (主量子数)が15から40のRydberg状態間の遷移周波数を測定することで、原子を取り囲む環境温度をその場(*in-situ*)測定し、BBRシフトに起因する不確かさを軽減することである。Rydberg遷移周波数をプローブとする環境温度の精密測定は、他の理論グループにより提案された手法であり、本研究で検証する。これはまだ他のどの研究機関でも行われていない手法である。

3. 研究の方法

本研究グループで運用されているYb光格子時計を用いてYb原子の時計遷移の上準位($6s6p\ ^3P_0$)とRydberg状態間の遷移周波数を測定し、そこから原子を取り囲む環境温度を求める。これによりBBRシフトを評価し、不確かさを低減する。

4. 研究成果

本研究課題を行う過程で、主に以下の研究成果を得た。

(1) 大強度かつ周波数ロックが堅牢な399 nm光源の開発

環境温度の測定に向けては、磁気光学トラップ中のYb原子数を増大させることが重要である。そこで、Yb原子のレーザー冷却と捕獲に必要な波長399 nmの光源を製作した。399 nmのレーザー光の増加に伴い、磁気光学トラップ中の原子数も増加する。波長798 nmの外部共振器半導体レーザー(ECDL)の光をテーパードアンプに入射し増幅した後、ポウタイ型光共振器中に設置したPPKTP結晶を用いた第二次高調波発生により、約100 mWの出力の399 nmのレーザー光を得た。これまでは、本研究グループのYb光格子時計では、波長399 nmの外部共振器半導体レーザーを399 nm光源として使用しており、その出力は約50 mWであった。これは用いる半導体レーザーの性能の限界である。しかし、今回は第二次高調波発生による方法を採用することにより、従来の約2倍の強度の光源の開発に成功した。次に、開発した399 nm光源の周波数を安定化した。Yb放電セルを用いてYb原子の飽和吸収分光を行い、その一次微分信号によりECDL(798 nm)を周波数安定化した。Modulation Transfer法を採用することで、堅牢な周波数安定化に成功した。

(2) Yb原子の $^1S_0 - ^1P_1$ 遷移の絶対周波数測定

(1)で開発した光源を用いて Yb 原子 MOT 生成、Rydberg 原子生成に進む予定であったが、Yb 光格子時計が不調であり予定通りに進まなかった。そこでこの光源を生かすために、Yb 原子の許容遷移($^1S_0-^1P_1$, 399 nm)の絶対周波数測定を行った。測定結果は、751 526 522.3(5) MHz であった(図 1 の赤丸)。この遷移の周波数値は、過去に他の 2 つのグループによる報告があるが、2 つの結果の間には大きな不一致があり議論の余地が残っていた。今回、光周波数を測定するための強力なツールである「光周波数コム」を用いてこの遷移の周波数を初めて測定した。これにより、信頼できる測定結果を得ることができた。この結果は間もなく誌上発表する予定である。

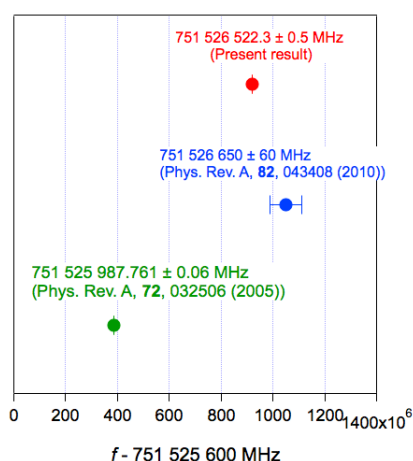


図 1: Yb 原子の $^1S_0-^1P_1$ 遷移の絶対周波数測定の結果。赤が今回の測定結果、青と緑は他のグループによる過去の測定結果である。

(3) ストロンチウム光格子時計の絶対周波数再測定

本研究の目的である Rydberg 遷移周波数測定による環境温度の測定は、ストロンチウム(Sr)光格子時計でも可能である。Sr 原子の時計遷移は、Yb 原子と同様に次世代の時間標準の有力な候補である。そこで、Sr 光格子時計を用いた本研究の遂行の可能性を検討した。そのためには、現状の Sr 光格子時計の精度をさらに上げる必要があったために、Sr 光格子時計の絶対周波数測定をさらに進めた。測定方法に工夫を施すことにより、以前に本グループが測定した結果よりも、3 倍以上の高精度での絶対周波数測定に成功した。測定された周波数値は 429 228 004 229 873.56(49) Hz であり、相対不確かさは 1.2×10^{-15} であった。本研究成果は、査読付き英文誌である Japanese Journal of Physical Society of Japan にて論文発表した。

またこの成果は、2015 年 9 月に行われた国際度量衡委員会傘下の時間周波数諮問委員会において、他のグループによる結果と併

せて議論された結果、Sr 原子の時計遷移の推奨周波数値と不確かさの更新に寄与した。上記の Rydberg 遷移周波数の測定には至っていないが、それに向けた足場を堅牢に固めることができたと言えるだろう。

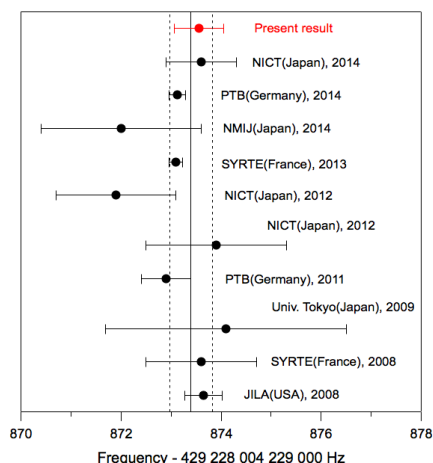


図 2: Sr 原子の時計遷移の絶対周波数測定の結果の国際比較。縦線は推奨周波数値 429 228 004 229 873.2 Hz を、縦の点線は不確かさの推奨値(5.0×10^{-16})を示す。

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 2 件)

1. Takehiko Tanabe, Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Takeshi Ikegami, Tomonari Suzuyama, Hajime Inaba, Sho Okubo, Masami Yasuda, Feng-Lei Hong, Atsushi Onae, and Kazumoto Hosaka, "Improved frequency measurement of the $^1S_0-^3P_0$ clock transition in ^{87}Sr using a Cs fountain clock as a transfer oscillator", Journal of the Physical Society of Japan, **84**(11), 115002-1~2 (2015), 査読有り, DOI : 10.7566/JPSJ.84.115002
2. Daisuke Akamatsu, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Kazumoto Hosaka, Takehiko Tanabe, Atsushi Onae, Feng-Lei Hong, "Frequency ratio measurement of ^{171}Yb and ^{87}Sr optical lattice clocks", Optics Express, **22**, 7898-7905 (2014), 査読有り, DOI : 10.1364/OE.22.007898

[学会発表](計 5 件)

1. 田邊 健彦, 赤松 大輔, 小林 拓実, 高見澤 昭文, 柳町 真也, 池上 健, 鈴山 智

也, 稲場 肇, 大久保 章, 安田 正美, 洪鋒雷, 大苗 敦, 保坂 一元, 「ストロンチウム原子の時計遷移の絶対周波数測定-SI 秒との比較における不確かさの軽減-」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学(東京都)

2. Takehiko Tanabe, Masami Yasuda, Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Hajime Inaba, Sho Okubo, Masami Yasuda, Atsushi Onae, Feng-Lei Hong and Kazumoto Hosaka, "Spectroscopy and frequency measurement of the clock transition in ^{171}Yb and ^{87}Sr based on linewidth transfer using a narrow linewidth frequency comb", The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'15), パシフィコ横浜(神奈川県).
3. 田邊 健彦, 赤松 大輔, 小林 拓実, 安田 正美, 稲場 肇, 大久保 章, 大苗 敦, 洪鋒雷, 保坂 一元, 「光周波数コムを用いたイッテルビウム原子の $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ 遷移の絶対周波数測定」, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川県).
4. Takehiko Tanabe, Daisuke Akamatsu, Masami Yasuda, Takumi Kobayashi, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Sho Okubo, Atsushi Onae and Feng-Lei Hong, "Absolute frequency measurements of the $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ transition in atomic Yb using the fiber laser-based frequency combs", NMIJ-KRISS-ECNU Workshop on Time and Frequency, AIST Tokyo Wavefront Annex(東京都).
5. 田邊 健彦, 赤松 大輔, 安田 正美, 小林 拓実, 保坂 一元, 稲場 肇, 大久保 章, 大苗 敦, 洪鋒雷, 「イッテルビウム原子の $^1\text{S}_0$ - $^1\text{P}_1$ 遷移の絶対周波数測定」, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学(北海道).

〔その他〕

国立研究開発法人産業技術総合研究所
計量標準総合センター 物理計測標準研究部門
時間標準研究グループ ホームページ
<https://unit.aist.go.jp/ripm/time-stdg/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田邊 健彦 (TANABE, Takehiko)

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・研究員

研究者番号：30613989