

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540472

研究課題名(和文) イッテルビウム光格子時計における青方魔法波長の探索

研究課題名(英文) Search for the blue-detuned magic wavelength for the ytterbium optical lattice clock

研究代表者

安田 正美 (Yasuda, Masami)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室付

研究者番号：50322045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、イッテルビウム(Yb)光格子時計における、光格子レーザー由来の不確かさ低減のために、Yb原子の青方離調魔法波長を探索することを目的として、以下の成果を得た。Yb光格子時計のさらなる高度化を達成し、絶対周波数測定不確かさを1桁以上低減した。これによりYb光格子時計が秒の2次表現に採択された。Yb/Sr光格子時計周波数比の直接測定に成功した。マイクロ波周波数基準による光シフト周波数測定と比べて、1桁以上測定時間を短縮できる。光シフト誘起用青色レーザー光源の開発に成功した。赤外線半導体レーザーを光増幅し、第2次高調波発生により、波長399nmで100mWの出力を達成した。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the uncertainty of the ytterbium (Yb) optical lattice clock due to the optical lattice laser, we tried to search for the blue-detuned magic wavelength of Yb and obtained the following results; 1: We have succeeded in improving our Yb optical lattice clock, reducing the uncertainty to 1/10 of that of our 2009 measurement, which led to the adaption of the Yb optical lattice clock as one of the secondary representation of the second. 2: We have succeeded in measuring the frequency ratio of the Yb and Sr optical lattice clocks by directly comparing the optical frequencies by an optical frequency comb, which allows us to measure the light shift frequency with ten times smaller integration time compared to the measurement with a microwave frequency standard. 3: We have developed a blue laser source for inducing the light shift to the clock transition of Yb. We have obtained the 100 mW of 399 nm laser by a second harmonic generation of the amplified infrared laser diode.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：光格子時計 イッテルビウム 絶対周波数計測 光周波数コム 青方離調魔法波長

1. 研究開始当初の背景

(1) 東京大学の香取教授により 2001 年に提案された光格子時計については、次世代光周波数標準の有力な候補として、世界中の標準研究所や大学で、熾烈な研究開発競争が繰り広げられている。光格子時計とは、時計遷移の基底状態と励起状態の光シフト(光強度に比例する項、いわゆる 1 次の光シフト)が等しくなるような波長(魔法波長)のレーザー光を空間的に重ね合わせて作られる光格子(定在波の腹)に原子を捕獲することで、ドップラーシフト・衝突シフトの除去、長時間観察することによる Q 値の増大、多数個の原子を観察することによる SN 比の増大など、原子時計に求められる各種性能を高い次元で両立できる手法である。

(2) しかし、光格子レーザー光強度の 2 乗よりも大きな高次光シフトについては、魔法波長によって除去することはできない。特に、時計遷移の上準位から、魔法波長光格子レーザー光の 2 光子分のエネルギー付近に、たまたま原子のエネルギー準位が存在する場合には、その高次光シフト量が共鳴的に増大することが知られており、 10^{-17} よりも小さな不確かさを目指す場合の障害となりうる(現在報告されている不確かさは、 7×10^{-17} である)。

(3) この問題に対して、東京大学の香取教授は、Sr 原子の場合について、原子の共鳴から正に離調をとる青方離調光格子の使用を提案し、理論的にこの場合の魔法波長を予測するとともに、実験的に青方離調魔法波長の決定に成功した。この場合、原子は光格子の腹ではなく、節の部分(電場強度ゼロの点)に捕獲されることとなり、高次光シフトを大幅に抑制することができる。

(4) 一方、光格子時計スキームが適用可能な原子種として、もうひとつの有力候補である Yb 原子の場合には、青方離調魔法波長の理論的な予測は困難であることが知られている。これは、Sr の場合には存在しなかった、内殻電子励起状態($4f^{13}5d6s^2(7/2, 5/2)_1^o$)、基底状態からのエネルギー 28857 cm^{-1} が存在し、また、そのエネルギーが、 $1P_1$ 状態(基底状態からのエネルギー 25068 cm^{-1}) に近接しているので、複雑な準位混交を起こすためである。そのため、第一原理計算によれば、青方離調側近辺(波長 399 nm 以下)のどこに魔法波長が存在するのか、またはそれ以前に、青方魔法波長自体が存在するか否かも、精度よく予測できないのが現状である。

(5) 当申請者の所属する研究グループにおいては、2009 年に世界に先駆けて ^{171}Yb 光格子時計の開発に成功し、そこで得られた ^{171}Yb の時計遷移($S_0-^3P_0$)周波数値は、同年開催された国際度量衡局傘下の時間周波数諮問委

員会において、推奨される周波数値として採択された。その後も、当研究グループにおいては、Yb 光格子時計の、さらなる不確かさ低減に向けた努力がはらわれている。光格子時計の不確かさ要因のうち、最大のものである黒体輻射シフトについては、低温環境を用意するなど、いくつかの直接的な対処方法が提案されている。しかし、高次光シフトを抑制するための青方離調魔法波長については、その存在の有無、または、もしも存在する場合の具体的な波長の値を予測するために必要となる、実験的な分光データが全く存在していない。逆に、このような分光データは、相対論的多体計算による、原子構造・原子間相互作用・原子固体間相互作用に係る理論の検証や、精度向上のために必要とされている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、イッテルビウム(Yb)光格子時計における、光格子レーザー由来の不確かさ低減のために、Yb 原子の青方離調魔法波長を探索することを目的とする。魔法波長とは、時計遷移周波数に対する最大の摂動要因であるドップラーシフトを抑制するために原子を空間的に強く束縛しながらも、それに対する 1 次光シフトの影響をキャンセルできる光格子レーザー波長のことである。

(2) しかし、従来の光格子は、原子の共鳴から大きく負に離調をとった赤方離調光格子であるため、原子は光電場強度の極大点に捕獲される。逆に、正に離調をとる青方離調光格子の場合には、原子は光電場強度がゼロの点に捕獲されるため、従来の魔法波長では除去できない高次光シフトによる不確かさを低減できる。

3. 研究の方法

既存の Yb 光格子時計実験装置を用いて、時計遷移($^1S_0-^3P_0$; 波長 578 nm)周波数の、波長 350 ~ 399 nm 領域の光シフトを測定し、分極率(差)が波長のどのような関数(シフト量と符号)となっているかを調べる。光シフト誘起用青色レーザーは、以下のいずれかの方法で得る。

- 1: 青色半導体レーザーを、外部共振器付半導体レーザーとして、直接用いる。
- 2: 赤外レーザーの第 2 次高調波発生による。赤外レーザーは、外部共振器付半導体レーザー(必要ならば、テーパードアンプなどのレーザー増幅器を用いる)または、既に保有しているチタンサファイアレーザーを用いる。

4. 研究成果

(1) 青方離調魔法波長を探索・決定するには、まず、素の状態の Yb 光格子時計の評価を完成しなくてはならない。そのために、Yb 光格子時計の絶対周波数測定をさらに進めた。特に、光格子レーザー偏光の変動を抑制する

ために、光ファイバー射出後に偏光ビームスプリッターを設置した。これにより、ベクトル光シフトに伴う周波数変動を抑制できた。各種レーザーの周波数安定化システムの改善により、最大6時間に渡る連続運転が可能となった。この状態で、当所の保有するUTC(NMIJ)を基準として、絶対周波数計測を行った。この結果、5年前(2009年)と比べて、一桁以上の不確かさ低減に成功した。この成果は、国際度量衡局傘下の時間周波数委員会に報告され、米国NISTでの測定結果とも合わせて、Yb光格子時計が秒の2次表現(秒の再定義候補)と採択されるに至った。(図1)

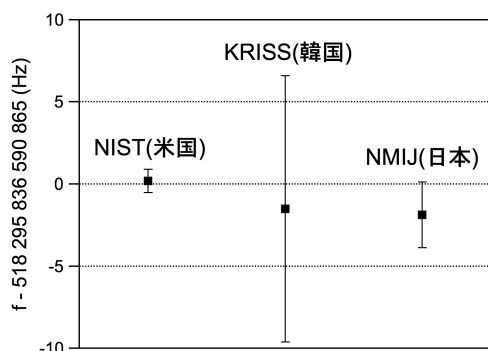


図1 . Yb光格子時計絶対周波数測定結果国際比較。左より、米国NIST、韓国KRISS、日本NMIJでの測定結果。

(2) 青方離調光シフト誘起用レーザー光源として、第二次高調波発生による青色レーザーシステムの開発を行い、共振器安定化の結果、青色レーザー光発生に成功した。また、LED光源による光シフト測定を試みたが、有意な光シフトを観測することはできなかった。そのため、波長373nmと396nmの半導体レーザーを準備した。以上により、青方離調魔法波長探索のための光シフト測定の準備は整いつつあるといえる。さらに、当所で開発がほぼ完了しているSr光格子時計を参照として用いることにより、マイクロ波周波数基準を使わない、光周波数標準同士の比較を行えば、さらに短時間での光シフト評価が可能になると考えられる。

(3) この青色レーザーによる光シフト量を速やかに測定するためには、セシウム原子時計やUTC(NMIJ)などのマイクロ波周波数標準に基づく測定ではなく、他の光周波数標準との直接的な比較を行うことが望ましい。そのために、独立に開発されたストロンチウム(Sr)光格子時計(絶対周波数評価済)との周波数比直接測定実験を行い、これに成功した。これは、異種光格子時計同士の直接比較実験としては世界で初めてである。(図2)セシウム原子時計を介さない、光周波数の直接比較のため、米国での測定よりも大幅に短い積算時間で、より小さな不確かさを達成することに成功した。また、その周波数比の値自体

は、両者の不確かさの範囲内で一致し、光ファイバーなどを用いない大陸間遠隔周波数比較をデモンストレートすることにも成功したといえる。

(4) 光シフト誘起用青色レーザー光源の製作のために、波長798nmの外部共振器半導体レーザーの光をテーパードアンプによって2W程度まで増幅し、光共振器中におけるPPKTP結晶による第二次高調波発生により約100mWの波長399nmの光を得た。実際の青方離調魔法波長の探索には至っていないが、上記の二つの達成状況により、Yb原子の青方離調魔法波長の探索は速やかに実行可能と考えられる。一方、波長399nmの光源はYb原子の冷却に必要であり、大強度の波長399nm光源の開発に成功したことは、捕獲原子数の増大にも直結するため、Yb光格子時計自体の性能向上に貢献する重要な成果と言える。

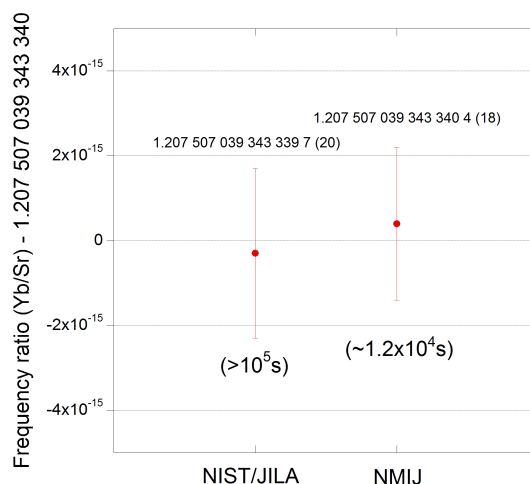


図2 . Yb と Sr 光格子時計の周波数比測定結果国際比較。左より、米国(NIST, JILA)、日本NMIJでの測定結果。

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3件)

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*, 査読有, Vol. 22, 2014, 7898-7905.

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, Feng-Lei Hong, "Improved Absolute Frequency Measurement of the ^{171}Yb 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.

安田正美、河野託也、保坂一元、稲場肇、中嶋善晶、赤松大輔、大苗敦、洪鋒雷、産総研におけるイッテルビウム光格子時計開発の現状、電気学会誌、査読無、ECT-11 巻、2011、7-10.

〔学会発表〕(計 8 件)

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, Feng-Lei Hong, “Improved Absolute Frequency Measurement of the 171Yb Optical Lattice Clock towards the Redefinition of the Second”, CLEO2013, 2013 年 6 月 11 日, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA.

安田正美、稲場肇、河野託也、田邊健彦、中嶋善晶、保坂一元、赤松大輔、大苗敦、鈴山智也、雨宮正樹、洪鋒雷、秒の再定義に向けたイッテルビウム光格子時計の絶対周波数測定、日本物理学界第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学(広島県)。

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, Feng-Lei Hong, “Improved Absolute Frequency Measurement of the 171Yb Optical Lattice Clock for the Redefinition of the Second”, NICT Workshop on the Optical Frequency Standards, 2013 年 2 月 7 日、情報通信研究機構(東京都)。

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, Feng-Lei Hong, “Improved Absolute Frequency Measurement of the 171Yb Optical Lattice Clock towards the Secondary Representation of the Second”, 第 5 回極低温グループ II 原子国際会議, 2012 年 10 月 11 日, 情報通信研究機構(東京都)。

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima, Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, Feng-Lei Hong, “Improved Absolute Frequency Measurement of the 171Yb Optical Lattice Clock at NMIJ”, 光コム、光時計及び関連デバイスワークショップ, 2012 年 10 月 3 日, 産総研つくばセンター(茨城県)。

Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takuya Kohno, Takehiko Tanabe, Yoshiaki Nakajima,

Kazumoto Hosaka, Daisuke Akamatsu, Atsushi Onae, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, Feng-Lei Hong, “Progress of the 171Yb Optical Lattice Clock at NMIJ, AIST”, CLEO2012, 2012 年 5 月 10 日, San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA.

安田正美、河野託也、保坂一元、稲場肇、中嶋善晶、赤松大輔、大苗敦、洪鋒雷、産総研におけるイッテルビウム光格子時計開発の現状、電気学会・電子回路研究会、2011 年 9 月 6 日、早稲田大学(東京都)。

Masami Yasuda, Takuya Kohno, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima, Atsushi Onae, Feng-Lei Hong, “Current status of the 171Yb optical lattice clock at NMIJ, AIST”, SPIE(invited), 2011 年 8 月 25 日, San Diego Convention Center, San Diego, CA, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 正美 (YASUDA, Masami)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室付

研究者番号：5 0 3 2 2 0 4 5

(2) 研究分担者

赤松 大輔 (AKAMATSU, Daisuke)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：9 0 5 4 9 8 8 3