

# 時間周波数の標準：高精度化への取り組み

## — フェルミ同位体を用いた Yb 光格子時計の開発 —

安田 正美<sup>\*, \*\*</sup>・河野 託也<sup>\*, \*\*</sup>・保坂 一元<sup>\*, \*\*</sup>・稲場 肇<sup>\*, \*\*</sup>  
中嶋 善晶<sup>\*, \*\*, \*\*\*</sup>・洪 鋒雷<sup>\*, \*\*</sup>

### Time and Frequency Standards: Efforts toward Further Improvement — Development of an Yb Optical Lattice Clock Using a Fermionic Isotope —

Masami YASUDA<sup>\*, \*\*</sup>, Takuya KOHNO<sup>\*, \*\*</sup>, Kazumoto HOSAKA<sup>\*, \*\*</sup>, Hajime INABA<sup>\*, \*\*</sup>,  
Yoshiaki NAKAJIMA<sup>\*, \*\*, \*\*\*</sup> and Feng-Lei HONG<sup>\*, \*\*</sup>

Recent rapid progresses in the field of optical frequency standards owe much to the invention of the optical lattice clock. Since the first proposal in 2001, the optical lattice clocks using several atomic species such as strontium (Sr), ytterbium (Yb), and mercury (Hg) have been developed worldwide. The  $^1S_0-^3P_0$  transition in  $^{87}\text{Sr}$  was already chosen to be one of the 'secondary representation of the second'. The same transition in Yb is also an excellent candidate for an optical frequency standard. We have developed a one-dimensional optical lattice clock with ultracold  $^{171}\text{Yb}$  atoms. The absolute frequency of the  $^1S_0(F=1/2)-^3P_0(F=1/2)$  clock transition in  $^{171}\text{Yb}$  is determined to be 518,295,836,590,864 (28) Hz with respect to the SI second. Details of the experimental setup, atom trapping experiments, and absolute frequency measurement procedures are also described.

**Key words:** optical frequency standards, optical lattice clock, ytterbium, fermionic isotope, secondary representation of the second

近年、光格子時計の発明により、光周波数標準の分野に著しい進歩がみられる。2001年の最初の提案以降<sup>1)</sup>、ストロンチウム (Sr)<sup>2-5)</sup>、イッテルビウム (Yb)<sup>6-13)</sup>、水銀 (Hg)<sup>14, 15)</sup>などの原子を用いた光格子時計の開発が、世界中で活発に行われている。フェルミ同位体である $^{87}\text{Sr}$ の $^1S_0-^3P_0$ 時計遷移は、すでに「秒の二次表現」として採択され<sup>16)</sup>、秒の再定義への動きを加速させた。一方、Ybの時計遷移も、光周波数標準の優れた候補として注目されてきた。

産業技術総合研究所計測標準研究部門では、以下の利点に着目し、 $^{171}\text{Yb}$ 光格子時計の開発を行ってきた<sup>13)</sup>。

- 1) 核スピンの小さいこと ( $I=1/2$ ,  $^{171}\text{Yb}$ の場合)。
- 2) 天然同位体の存在比が比較的均一であること。

3) 室温での黒体輻射シフトが、Srの場合の半分であること<sup>17)</sup>。

1) の、核スピンの小さいことにより、核スピンの大きい(例： $^{87}\text{Sr}$ の $I=9/2$ )ものと比べて、希望する磁気副準位への光ポンピングが容易になることと、光格子レーザーによる光シフトのテンソル成分がゼロになるという2つの利点がある。また、フェルミ同位体 ( $^{171, 173}\text{Yb}$ )の場合、基底状態の超微細分裂により、偏光勾配冷却の機構が働く<sup>18)</sup>。そのため、ボース同位体 ( $^{174}\text{Yb}$ )に比べて冷却温度が低くなり、光格子への捕獲が容易になる。さらに、スピン偏極したフェルミ同位体を用いれば、衝突シフトのない時計が作れる。2) の、天然同位体の存在比が比較的均一であることにより、実験系の最適化が容易になる。光格子

\*産業技術総合研究所計測標準研究部門時間周波数科波長標準研究室 (〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央第3)

E-mail: masami.yasuda@aist.go.jp

\*\*科学技術振興機構 CREST (〒332-0012 川口市本町 4-1-8)

\*\*\*福井大学工学部 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

時計の不確かさのうち、最大の要因は、黒体輻射によるものであるため、3) も重要な理由である。

このたびわれわれは、極低温  $^{171}\text{Yb}$  原子を用いた一次元光格子時計の開発に成功した。その時計遷移 ( $^1S_0\text{-}^3P_0$ ) の絶対周波数は、518,295,836,590,864 (28) Hz であった。本稿では、実験装置や原子捕獲実験、さらに、絶対周波数計測等の詳細について述べる。

## 1. 実験手順および実験装置

光格子生成のために使用できるレーザー強度により、光格子ポテンシャルの閉じ込め深さは、温度換算で約 50  $\mu\text{K}$ 、重力エネルギー換算で 0.25 mm に制限される。Yb 金属蒸気の初期温度は 770 K であり、重力エネルギー換算では 4,000 m に相当する。つまり、標高 4,000 m の山の頂上から落下してきた粒子を、深さ 0.25 mm の容器に閉じ込めなくてはならない。よって、この光格子中に原子を捕獲するための作業のほとんどは、原子の運動エネルギーを低減すること、すなわち原子のレーザー冷却である。時計遷移分光実験の手順は、以下ようになる。1) 原子オープンによる Yb 蒸気および原子線の生成、2) ゼーマンスローワーによる原子線の減速、3) 第一段階磁気光学トラップ (magneto-optical trap; MOT) による原子の冷却・捕獲、4) 第二段階 MOT による、さらなる原子冷却、5) 光格子による極低温原子の捕獲、6) 時計遷移励起用レーザー照射、7) 励起されなかった基底状態原子の検出。図 1 に  $^{171}\text{Yb}$  のエネルギー準位図を示す。 $^1S_0\text{-}^3P_0$  遷移は自然幅が 44 mHz であり、時計遷移として用いられる。

### 1.1 Yb 原子のレーザー冷却・捕獲

極低温原子は、残留気体分子との衝突を抑制するために、超高真空槽内で用意する。Yb 原子蒸気を生成するために、Yb 金属片を内蔵したオープンで 770 K まで加熱した。この Yb 蒸気は、ハニカム型断面をもつ噴射ノズルを通過し、原子線となった。このノズルは、詰まりを防ぐために、オープン本体よりも高温の 870 K に加熱されている。強い双極子遷移 ( $^1S_0\text{-}^1P_1$ ; 波長 399 nm, 線幅 28 MHz) を用いて長さ 16 cm のゼーマンスローワー内で減速された原子線は、終端速度 10 m/s で原子捕獲用チャンバーに進入する。このチャンバー内の圧力は、 $1 \times 10^{-7}$  Pa である。第一段階 MOT (blue MOT) にも、同じ双極子遷移を用いた。これらのためのレーザー光は、InGaN 半導体レーザーによって得た。Littrow タイプの外部共振器半導体レーザー (external cavity diode laser; ECDL) を構成し、Yb ホローカソードランプを用いた飽和吸収分光により周波数安定化を施した<sup>19)</sup>。Blue MOT 中で、約 1,000 万個の原子を

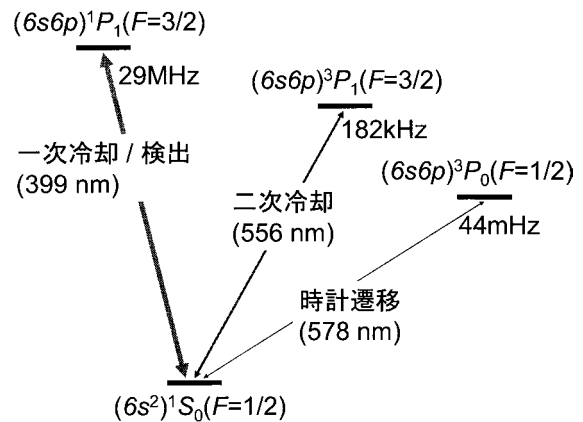


図 1 Yb 原子のエネルギー準位図。

捕獲し、6 mK まで冷却した。次に、原子をさらに冷却するために、レーザー光と磁場勾配を切り替えて、スピン禁制遷移 ( $^1S_0\text{-}^3P_1$ , 波長 556 nm, 自然幅 182 kHz) を用いた第二段階 MOT (green MOT) を生成した。556 nm の緑色レーザー光は、波長 1,112 nm のファイバーレーザーの第二次高調波発生 (second harmonic generation; SHG) によって得た。このファイバーレーザーの周波数安定化は、自作光周波数コムに位同期を施すことで行った<sup>20)</sup>。この周波数安定化は非常に堅牢であり、いちど周波数ロックをかけると、数週間はロックが外れない。SHG は、導波路型周期分極反転ニオブ酸リチウム (periodically poled lithium niobate; PPLN) によって行なった。導波路モードに 50 mW の 1,112 nm レーザーを結合することで、556 nm レーザーについて、5 mW の出力が得られた。この green MOT によって、約 100 万個の原子を捕獲した。捕獲用レーザー周波数を適切に変化させて、3 つの同位体 ( $^{174}\text{Yb}$  ( $I=0$ ),  $^{171}\text{Yb}$  ( $I=1/2$ ),  $^{173}\text{Yb}$  ( $I=5/2$ )) を捕獲し、光格子に捕獲可能な温度まで冷却されたかどうかを確認するために、飛行時間法により、green MOT 中の原子の温度計測を行った。その結果、原子温度は、 $^{174}\text{Yb}$ ,  $^{171}\text{Yb}$ ,  $^{173}\text{Yb}$  について、それぞれ 130  $\mu\text{K}$ , 40  $\mu\text{K}$ , 15  $\mu\text{K}$  であった。過去の理論や実験から示されたのと同様に、核スピンの大きいほど、原子温度は低かった<sup>18)</sup>。 $^{173}\text{Yb}$  のほうが  $^{171}\text{Yb}$  よりも低い温度であったが、周波数標準としての優位性から、以下の実験では  $^{171}\text{Yb}$  を選択した。またその温度は、光格子ポテンシャルの深さよりも低いものであった。波長 759 nm の光格子レーザーは、Ti:S レーザー (10W 励起, 出力 1.3 W) を用い、真空槽の中心部で焦点距離 200 mm のレンズによって焦点 (ビームウェスト 23  $\mu\text{m}$ , レーザー強度 500 mW) を結ばせた。

### 1.2 光格子による Yb 原子捕獲手順

原子捕獲実験の最終段階で最も重要な作業が、光格子

レーザーのアライメント、つまり光格子レーザーの焦点位置を green MOT に重ね合わせることである。光格子レーザーは非共鳴であるために、基底状態原子と直接相互作用しないので、 $^3P_1$ - $^3S_1$  (680 nm) 遷移に共鳴するガイドレーザーを別に用意した。光格子用レーザーとガイドレーザーは、同一の光ファイバーに結合させてあるので、横方向の焦点位置は同じである。しかし、縦方向の焦点位置は、色収差によりシフトする。よって、あらかじめ、このシフト量を評価しておく必要がある。このガイドレーザー光が green MOT 中の原子に照射されると、原子ポビュレーションがレーザー光と相互作用しない  $^3P_0$  または  $^3P_2$  状態に移行するので、green MOT 中の原子数が減少する。この減少量が最大となるように、ガイドレーザー光の焦点位置を調整し、最後に色収差によるシフト分を補正して、光格子レーザーの焦点と green MOT の位置を重ね合わせた。原子の温度は、556 nm レーザー光強度におおよそ比例するので、光格子に原子を装填する直前に、このレーザー光強度を減少させ、光格子への移行効率を増した。光格子中に原子が捕獲されたことは、波長 399 nm のプローブ光を照射して得られる散乱光によって確認した。散乱光は、光電子倍增管によって検出した。この蛍光強度が大きくなるように、補正磁場を調整することで、原子の位置の微調整を行った。この蛍光信号は、そのままの形で、時計遷移の分光に利用することができる。光格子レーザーのアライメントが完了した後に、参照用ピンホール (直径 50  $\mu\text{m}$ ) とフリッパーミラーを設置した。このピンホールにより、時計レーザーやプローブレザーのアライメントが容易になった。光格子レーザーは凹面鏡 (曲率半径 200 mm) により折り返した。このアライメントは、同じ光ファイバーに結合する効率を最大化することで行った。再結合した光は、アイソレーターの入射側の偏光子によって反射されるので、フォトダイオードでその強度を観察できた。結果として、約 1 万個の原子を光格子に捕獲できた。

### 1.3 波長 578 nm 時計レーザー

きわめて線幅の狭い時計遷移を励起するための超安定な時計レーザーは、どの光時計にとっても鍵となる重要な要素である<sup>21)</sup>。Yb 原子の時計遷移 ( $^1S_0$ - $^3P_0$ ) の波長は 578 nm であり、自然幅は 44 mHz である。波長 578 nm のレーザー光は、Nd : YAG レーザー光と Yb : YAG レーザー光の和周波混合 (sum frequency generation; SFG) によって得た。波長 1,319 nm の Nd : YAG レーザー光と、波長 1,030 nm の Yb : YAG レーザー光は波長分割多重 (wavelength division multiplexing; WDM) カップラーによって混合し、リッジ導波路型 PPLN デバイスに送られる。PPLN の温度

は、578 nm 光の出力が最大になるよう、44°C に調整した。この位相整合条件のもとで、時計レーザー出力は 150 mW であった。このとき、Nd : YAG レーザー入力パワーは 290 mW、Yb : YAG レーザー入力パワーは 420 mW であったが、ファイバー結合やファイバー透過などの損失を考慮すると、入射した各レーザーパワーの約半分が PPLN に結合していると考えられる。

時計レーザーの周波数安定化と線幅狭窄化は、光共振器の TEM<sub>00</sub> モードに対する誤差信号を、Pound-Drever-Hall (PDH) 法によって、Nd : YAG 結晶に接着されたピエゾ素子にフィードバックすることで行った。誤差信号を得るための変調は、変調周波数 2.5 MHz で駆動した電気光学変調素子 (electro-optic modulator; EOM) によって行った。高フィネスファブリー・ペロー共振器 (フィネス  $\sim 400,000$ ) は、長さ 75 mm、直径 25.4 mm の超低膨張 (ultra low expansion; ULE) ガラス製であり、 $3 \times 10^{-5}$  Pa の圧力の真空槽内に、垂直に保持した<sup>22)</sup>。この真空槽は、2 重に温度制御されている。第 1 層はアルミ製真空槽表面であり、第 2 層はそれを取り囲む銅製の箱である。これにより、数 mK 精度での温度制御が可能となった。この真空槽は、受動式除振台の上に設置してある。

時計レーザー光は 2 つに分割し、それぞれ、時計レーザー本体とは別の部屋にある、光周波数コムと、光格子中の極低温 Yb 原子に対して、シングルモード光ファイバーによって伝送した。特に、Yb 光格子に時計レーザー光を伝送するための長さ 44 m のシングルモード光ファイバーには、ノイズキャンセルを施してある。これは、途中の環境の温度変化や振動によって光ファイバーの屈折率が変化することによる、レーザー光の位相ノイズを除去するためである。最終段では、ダブルパス音響光学素子 (acousto-optic modulator; AOM) によって、ULE 共振器の共鳴周波数と Yb 原子の時計遷移周波数をつないでいる。

ULE ガラスは、熱膨張係数が正の素材と負の素材の混合物であり、その熱膨張係数がある温度でゼロとなることが知られている。この「ゼロクロス温度」を決定するために、ULE 共振器の温度を変化させながら、共鳴周波数を光周波数コムによって測定した。この結果、ゼロクロス温度は、21.6°C と求められた。次に、共振器の温度をこのゼロクロス温度に固定したのち、共鳴周波数の長期ドリフトを、水素メーザーを基準にした光周波数コムによって測定した。その結果、240 mHz/s の線形な周波数ドリフトが観測された。これは、ULE ガラスのクリープ現象 (アモルファスの再結晶化) によるものと考えられる。時計レーザー周波数からこの線形ドリフト分を差し引いたものか

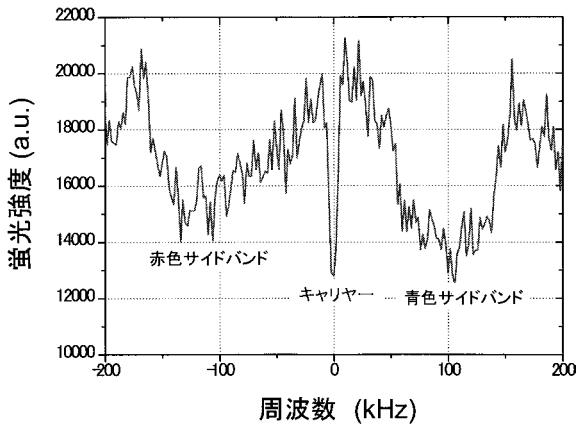


図2 時計遷移スペクトルのサイドバンド構造.

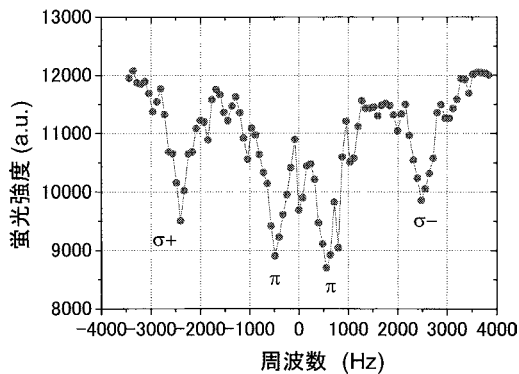


図3 時計遷移スペクトルのキャリアー成分. 4つのゼーマン成分に分裂している.

ら、周波数安定度を  $5.2 \times 10^{-13}$  @ 1 s と求めることができた.

## 2. 時計遷移分光と絶対周波数計測

光格子に捕獲された  $^{171}\text{Yb}$  原子の時計遷移分光は、電子シェルピング法を用いて行った。すなわち、時計レーザー (578 nm) 照射後、励起されなかった基底状態の原子数を、強い双極子遷移 (399 nm) による蛍光を利用して測定した<sup>23)</sup>。実験手順は、原子捕獲実験とほとんど同じであるが、原子検出の前に時計レーザーを照射することだけが異なる。時計レーザーの照射時間は、ラビ振動周期の 1 ms よりもずっと大きな 100 ms とした。よって、時計レーザーが遷移に共鳴した場合、位相緩和の結果として約 50% の原子が励起されると考えられる。ULE 共振器の共鳴周波数と原子の遷移周波数をつないでいるダブルパス AOM の周波数を掃引しながら、蛍光強度をコンピューターで記録することで、時計遷移のスペクトル線を描いた。図2に 400 kHz レンジのスペクトルを示す。光格子中での分光に特有な狭いキャリアー成分 ( $n \rightarrow n$ ) と、その両側のサイドバンド成分 ( $n \rightarrow n \pm 1$ ) をみてとれる ( $n$  は光格

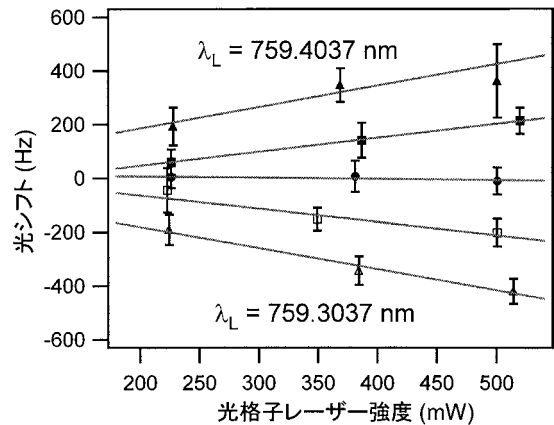


図4 魔法波長の決定. 光格子レーザー波長を 759.3 nm 付近で変化させ、光シフトを光格子レーザー強度の関数としてプロットした.

子ポテンシャル中の閉じ込め量子準位数)。

図3には、そのキャリアー成分を拡大した、8 kHz レンジのスペクトルを示してある。その結果、均一磁場中での分光による、4つのゼーマン成分を観測できた。データの積算を行う前に、各データ点に対応する絶対周波数を決定し、共振器のドリフトを除去した。観測されたゼーマン成分は、数百 Hz の線幅であった。各成分の中心周波数は、実験データを、ローレンツ曲線でフィッティングすることにより求めた。時計遷移周波数は、すべてのゼーマン成分の中心周波数を平均し、一次のゼーマンシフトをキャンセルして求めることができた。

次に、魔法波長を決定するために、図4にあるように、光格子レーザー波長を 759.3 nm 付近で変化させながら、光シフトを光強度の関数として測定した。各データ点は、図3にあるようなスペクトルから計算した。不確かさはゼーマン成分の中心値を求めるためのフィッティングから生じた。図5に示すフィッティング直線の傾き (光シフトの変化量) は、魔法波長を横切るにつれて、負から正へと符号を変えている。この光シフトの変化量がゼロを横切る点が魔法波長であり、フィッティングから、759.353 (3) nm と求められた。この魔法波長の不確かさにより、時計遷移周波数に対して 14 Hz のスカラー光シフトの不確かさが生じた。トータルシステム不確かさは、27 Hz と計算された。補正や不確かさの見積り詳細は、文献23) に詳しい。

図6に、12回の絶対周波数計測の結果を示す。この平均値は、518,295,836,590,864 Hz であった。中心値の標準偏差は 5.6 Hz であった。この統計的不確かさと、27 Hz の系統的な不確かさを結合した不確かさは、28 Hz となった。

今回の測定値は、メートル条約関連会議 (CIPM) にお

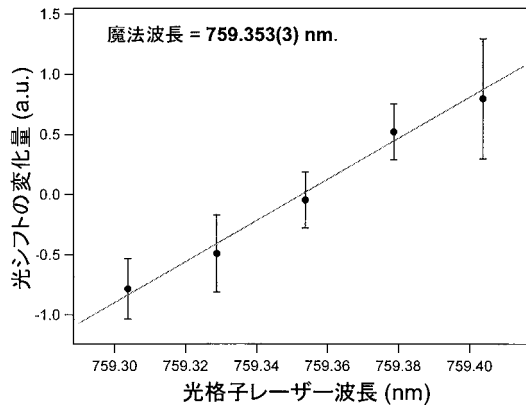


図5 魔法波長の決定。魔法波長は微分光シフトがゼロとなる点として、759.353(3) nmと求められた。

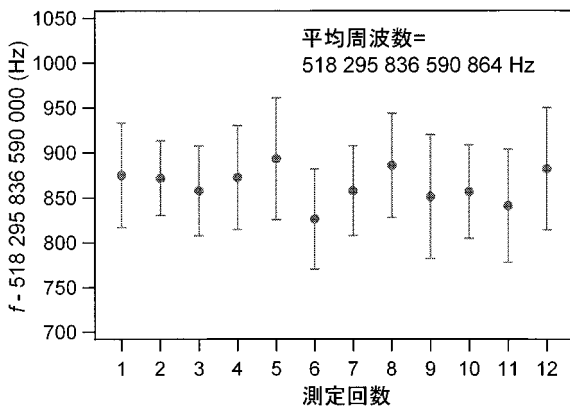


図6  $^{171}\text{Yb}$ の時計遷移 ( $^1\text{S}_0(F=1/2) \rightarrow ^3\text{P}_0(F=1/2)$ )の絶対周波数測定結果。12回の測定の平均周波数は518,295,836,590,864 Hzであった。

いて報告され、 $^{171}\text{Yb}$ の時計遷移 ( $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ )周波数の推奨値として世界で初めて採択された。これにより、Yb光格子時計が秒の「二次表現」として採択される道を開いた。

今回の測定の不確かさ (28 Hz, 相対不確かさ  $5.4 \times 10^{-14}$ )は、スペクトルのS/N比を向上させ、時計レーザー周波数を時計遷移にロックすることによって、比較的容易にCsリミットまで向上できると期待される。それ以上の不確かさ低減のためには、もうひとつ独立に、光周波数標準が必要となる。

本稿では、フェルミ同位体 $^{171}\text{Yb}$ を用いた光格子時計の詳細について説明した。われわれは、極低温 $^{171}\text{Yb}$ 原子を、魔法波長の光格子に捕獲した。さらに、波長578 nmの超安定・全固体化レーザーシステムを開発した。これらのシステムを用いて、 $^{171}\text{Yb}$ の時計遷移 ( $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ )の絶対周波数測定を行った。その結果は、518,295,836,590,863(28) Hzであった。現在は、さらなる不確かさの低減に向けて、スペクトルのS/N比を向上させ、時計レーザーを時

計遷移にロックするなどの作業を進行中である。

## 文 献

- 1) H. Katori: "Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement," *Proceedings of the 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology*, ed. P. Gill (World Scientific, Singapore, 2002) p. 323-330.
- 2) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi and H. Katori: "An optical lattice clock," *Nature*, **435** (2005) 321-324.
- 3) R. L. Targat, X. Baillard, M. Fouché, A. Bruschi, O. Tcherbakoff, G. D. Rovera and P. Lemonde: "Accurate optical lattice clock with  $^{87}\text{Sr}$  atoms," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 130801.
- 4) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae and H. Katori: "Improved frequency measurement of a one-dimensional optical lattice clock with a spin-polarized fermionic  $^{87}\text{Sr}$  isotope," *J. Phys. Soc. Jpn.*, **75** (2006) 104302.
- 5) M. M. Boyd, A. D. Ludlow, S. M. Foreman, S. Blatt, T. Ido, T. Zelevinsky and J. Ye: " $^{87}\text{Sr}$  lattice clock with inaccuracy below  $10^{-15}$ ," *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 083002.
- 6) S. G. Porsev, A. Derevianko and E. N. Fortson: "Possibility of an optical clock using the  $6^1\text{S}_0 \rightarrow 6^3\text{P}_0^\circ$  transition in  $^{171,173}\text{Yb}$  atoms held in an optical lattice," *Phys. Rev. A*, **69** (2004) 021403 (R).
- 7) C. W. Hoyt, Z. W. Barber, C. W. Oates, T. M. Fortier, S. A. Diddams and L. Hollberg: "Observation and absolute frequency measurements of the  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$  optical clock transition in neutral ytterbium," *Phys. Rev. Lett.*, **95** (2005) 083003.
- 8) T. Hong, C. Cramer, E. Cook, W. Nagourney and E. N. Fortson: "Studies of the  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$  transition in atomic ytterbium for atomic clocks and qubit arrays," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 2644-2646.
- 9) A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, C. W. Oates, C. W. Hoyt, Z. W. Barber and L. Hollberg: "Magnetic field-induced spectroscopy of forbidden optical transitions with application to lattice-based optical atomic clocks," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 083001.
- 10) Z. W. Barber, C. W. Hoyt, C. W. Oates, L. Hollberg, A. V. Taichenachev and V. I. Yudin: "Direct excitation of the forbidden clock transition in neutral  $^{174}\text{Yb}$  atoms confined to an optical lattice," *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 083002.
- 11) A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, V. D. Ovsiannikov and V. Pal'chikov: "Optical lattice polarization effects on hyperpolarizability of atomic clock transitions," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 173601.
- 12) N. Poli, Z. W. Barber, N. D. Lemke, C. W. Oates, L.-S. Ma, J. E. Stalnaker, T. M. Fortier, S. A. Diddams, L. Hollberg, J. C. Bergquist, A. Bruschi, S. Jefferts, I. Heavner and I. Parker: "Frequency evaluation of the doubly forbidden  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$  transition in bosonic  $^{174}\text{Yb}$ ," *Phys. Rev. A*, **77** (2008) 050501 (R).
- 13) M. Yasuda, F.-L. Hong, T. Kohno, H. Inaba, K. Hosaka, C. Willis, T. Kurosu, A. Onae and S. Ohshima: "Present status of the development of an Yb optical lattice clock at NMIJ/AIST," *Proc. SPIE*, **6673** (2007) 66730D.
- 14) H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto and H. Katori: "Trapping of neutral mercury atoms and prospects for optical lattice clocks," *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 053001.
- 15) M. Petersen, R. Chicireanu, S. T. Dawkins, D. V. Magalhães, C. Mandache, Y. Le Coq, A. Clairon and S. Bize: "Doppler-free spectroscopy of the  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$  optical clock transition in laser-cooled fermionic isotopes of neutral mercury," *Phys. Rev. Lett.*, **101** (2008) 183004.
- 16) CIPM (International Committee for Weights and Measures) recommendation, October 2006.

- 17) S. G. Porsev and A. Derevianko: "Multipolar theory of black-body radiation shift of atomic energy levels and its implications for optical lattice clocks," *Phys. Rev. A*, **74** (2006) 020502 (R).
- 18) R. Maruyama, R. H. Wynar, M. V. Romalis, A. Andalkar, M. D. Swallows, C. E. Pearson and E. N. Fortson: "Investigation of the sub-Doppler cooling in an ytterbium magneto-optical trap," *Phys. Rev. A*, **68** (2003) 011403 (R).
- 19) T. Kohno, M. Yasuda, H. Inaba and F.-L. Hong: "Optical frequency stability measurement of an external cavity blue diode laser with an optical frequency comb," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 8856-8858.
- 20) H. Inaba, Y. Daimon, F.-L. Hong, A. Onae, K. Minoshima, T. R. Schibli, H. Matsumoto, M. Hirano, T. Okuno, M. Onishi and M. Nakazawa: "Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb," *Opt. Express*, **14** (2006) 5223-5231.
- 21) K. Hosaka, M. Yasuda, H. Inaba, T. Kohno, Y. Nakajima, A. Onae and F.-L. Hong: "Development of an ultra-narrow-linewidth laser for interrogating the  $^1S_0$ - $^3P_0$  clock transition in Yb atoms," *Proceedings of EFTF-IFCS 2009* (Besançon, France, 20-24 April, 2009) pp.747-750.
- 22) M. Notcutt, L.-S. Ma, J. Ye and J. L. Hall: "Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity," *Opt. Lett.*, **30** (2005) 1815-1817.
- 23) T. Kohno, M. Yasuda, K. Hosaka, H. Inaba, Y. Nakajima and F.-L. Hong: "One-dimensional optical lattice clock with a fermionic  $^{171}\text{Yb}$  isotope," *Appl. Phys. Express*, **2** (2009) 072501.

(2009年10月10日受理)