

4-6 インジウムイオン光周波数標準

4-6 Indium Ion Optical Frequency Standard

大坪 望 李 瑛 松原健祐 Nils Nemitz 蜂須英和 石島 博 早坂和弘 井戸哲也
 Nozomi OHTSUBO, Li YING, Kensuke MATSUBARA, Nils NEMITZ, Hidekazu HACHISU, Hiroshi ISHIJIMA,
 Kazuhiro HAYASAKA, and Tetsuya IDO

NICTではインジウムイオン ($^{115}\text{In}^+$) 光周波数標準 (光時計) の研究開発を行っている。 $^{115}\text{In}^+$ の時計遷移周波数は電場・磁場や黒体輻射などの影響を受けづらく、 10^{-18} の相対不確かさが達成できる周波数標準として期待されている。本稿ではリニアトラップ中でカルシウムイオン ($^{40}\text{Ca}^+$) により共同冷却した $^{115}\text{In}^+$ を用いた光時計について詳説し、研究の進捗について報告する。2017年には時計遷移周波数を 5×10^{-15} の確度で計測し、国際度量衡委員会 (CIPM) 推奨値の改訂に大きく貢献した。その後の研究において、特定準位への光ポンピングを行うことでより精密な周波数分光を実現したインジウムイオンでは世界で初めて、時計レーザーの時計遷移への周波数ロック動作を達成した。

Singly-ionized indium is a candidate for a highly accurate ion clock with uncertainty at the 10^{-18} level owing to low sensitivities to surrounding fields. In this report, we summarize the progress of an optical clock based on an indium ion ($^{115}\text{In}^+$) sympathetically cooled with a calcium ion ($^{40}\text{Ca}^+$) in a linear trap. In 2017, we measured the absolute frequency of the clock transition with an uncertainty of 5×10^{-15} , resulting in an update of the Comite International des Poids et Mesures (CIPM) recommended frequency. Since then the observed linewidth of the spectrum was reduced successfully by optical pumping to specific Zeeman substates, and the stabilization of the clock laser to the transition was demonstrated for the first time in an In^+ system.

1 研究背景

1.1 光周波数標準

光周波数領域の原子時計 (以下光時計) は、イオントラップ技術を用いた単一イオン光周波数標準 (イオン光時計) と中性原子の光トラップを利用した光格子時計に大別される。光時計は、

1. レーザー冷却により極低温まで冷却された原子・イオンを利用しているため、ドップラー効果による時計周波数への影響が小さい。
2. イオントラップや光格子技術を利用した強い束縛により、ラムディック状態と呼ばれる反跳シフトを抑えた状態を実現できる。
3. 数百 THz の光遷移を時計遷移として利用しており、数 GHz のマイクロ波遷移の場合よりも同じ不確かさに対する相対不確かさが極めて小さい。なお、本章で解説する $^{115}\text{In}^+$ 時計の利用する時計遷移周波数は 1267 THz で、これは現在知られている光時計の中では最も高い周波数である。

などの性質を持つ。これまでに多くの研究機関によって現在の秒の定義を担っているマイクロ波セシウム (Cs) 原子時計の確度を越えた計測を実現してきた。

光時計は 1980 年代に H. Dehmelt らによってイオントラップ方式が提案され [1]、その実現が期待されていた。2000 年代前半には光領域の絶対周波数を計測可能とする光周波数コムが発明され、光領域の精密周波数計測が現実的になった。また同時期には香取らによって光格子時計が提案され [2]、それ以降各々の方式・原子種で競争的に開発が進められている。

NICTでは、 $^{40}\text{Ca}^+$ を用いたイオン光時計と、ストロンチウム原子を用いた光格子時計の開発を行ってきた。第3期中長期計画 (2011年～2015年) から、 $^{40}\text{Ca}^+$ よりも周波数標準として高い性能を持つ $^{115}\text{In}^+$ イオン光時計の開発を始めた。本稿ではこの $^{115}\text{In}^+$ イオン光時計についての解説と報告を行う。

1.2 イオン光周波数標準

イオン光周波数標準はイオントラップで捕捉したイ

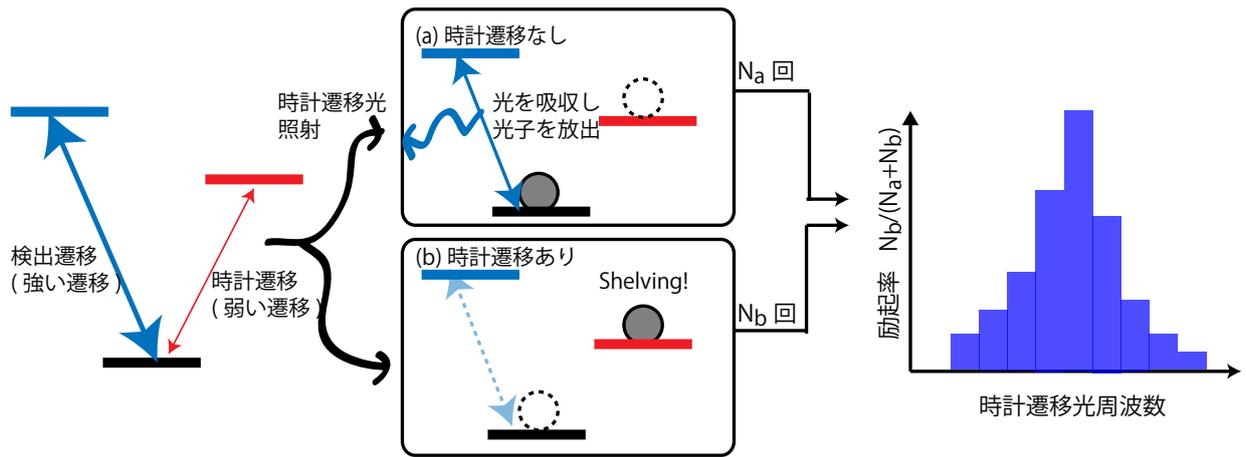


図1 電子シェルビング法による時計遷移励起計測方法と、それを用いた時計遷移スペクトルの計測方法

オンを対象に特定の光学遷移の周波数を計測し、その遷移周波数を標準周波数として利用する。イオントラップは帯電したイオンを電気的な作用で捕捉する技術で、開発者の H. Dehmelt・W. Paul らは 1989 年にノーベル物理学賞を受賞した。

図1にイオンの周波数計測で用いる電子シェルビング法について示す。電子シェルビング法で周波数を計測するためには2つの遷移が必要となる。1つは実際に周波数の基準となる「時計遷移」で、高精度での周波数計測に適した線幅が狭い禁制遷移が選ばれる。この時計遷移はその線幅の小ささから直接自然放出光を検出することはできない。そこでもうひとつの強い遷移を「検出遷移」として用いることで遷移励起の有無を確認する。照射した時計遷移レーザー周波数が、原子共鳴周波数から外れていた時、原子は基底状態のまま維持され、検出光の吸収・放出を行う。しかし、原子共鳴付近の時計レーザー光を照射すると一定確率で時計遷移を起し励起準位に棚上げ (shelving) される。棚上げされた状態のイオンは検出光との相互作用をしないので、光子を放出しない。このため検出遷移による光子放出の有無で時計遷移励起を検出することができる。この試行を 100 回程度行い、その結果より励起確率を計算する。時計遷移周波数を掃引しつつ励起確率を調べることで時計遷移スペクトルを得ることがで

きる。

1.3 イオン光時計の種類

イオン光時計には2族(II族)元素を主とするアルカリ金属型電子配置を持つイオンと、13族(IIIB族)元素によるアルカリ土類金属型電子配置を持つイオンが広く用いられている(表1参照)。アルカリ金属型イオンにはCa⁺, Sr⁺などが含まれ、一般的にJ=1/2 → J=5/2の四重極遷移を時計遷移として利用する。また希土類元素であるYb⁺もアルカリ金属型イオンと同様の性質を持ち、また四重極遷移のみならず八重極遷移も時計遷移として利用することができる。アルカリ土類金属型イオンにはアルミニウムイオン(²⁷Al⁺)やIn⁺が含まれ、スピン禁制のJ=0 → J=0遷移が利用される。

アルカリ金属型イオン時計は必要となる光学遷移の多くが可視領域にあり、半導体レーザーや第二次高調波技術で容易に実現できるという利点があるものの、時計遷移が電場・磁場の影響を受けやすいという性質があり、精密な周波数計測の際にはこれらに起因する系統不確かさの取扱いに注意が必要である。

アルカリ土類金属型イオン時計は、その光学遷移波長が深紫外・真空紫外領域にあり、光源や光学素子の調達など技術的に困難な部分が多いが、時計遷移は外

表1 各種イオン時計遷移の性能比較

f₀は時計遷移の周波数、g_g及びg_eはそれぞれ基底準位・励起準位のg因子、Θは四重極場の大きさ、Δf_{BRR}は黒体輻射シフトの大きさを示している。

	f ₀	g _g	g _e	Θ / (e a ₀ ²)	Δf _{BRR} @300 K	主たる研究組織
⁴⁰ Ca ⁺	411 THz	2.002	1.200	1.83	0.38 Hz	NICT (日) [3]、WIPM (中) [4]
⁸⁸ Sr ⁺	445 THz	2.002	1.2	2.6	0.25 Hz	NPL (英) [5]、NRC (加) [6]
¹⁷¹ Yb ⁺ (E3)	642 THz	1.998	1.145	-0.041	-0.067 Hz	PTB (独) [7]、NPL (英) [8]
²⁷ Al ⁺	1121 THz	-0.8 e-3	-2.0 e-3	0	-0.0043 Hz	NIST (米) [9]
¹¹⁵ In ⁺	1267 THz	-0.6 e-3	-0.99 e-3	0	-0.017 Hz	NICT (日)

場からの影響を受けづらく、時計として優れている。アルカリ土類金属型時計は 1S_0 と 3P_0 間の時計遷移は電子系総角運動量 $J=0$ の二準位間の遷移であることから、四重極電場や磁場による周波数シフト要因が極めて小さい。これは電気四重極遷移を時計遷移として用いる、電磁場変動に比較的感度の高いアルカリ金属型電子配置イオン種とは対照的である。また、遷移周波数がすべて紫外領域にあることも幸いし、黒体輻射によるシフトも極めて小さいという性質を持つ。 $^{115}\text{In}^+$ の持つアルカリ土類金属型電子配置イオン種の利点は $^{27}\text{Al}^+$ 光時計で活用され、 10^{19} 台の不確かさを実現できることが実証されている [9]。

1.4 In^+ イオン光時計

アメリカ国立標準技術研究所 (NIST) で開発された Al^+ イオン周波数標準は、振動モードを介在することで周波数計測を行うイオンとは異なるイオンに量子状態を転写する「量子論理分光 (Quantum Logic Spectroscopy: QLS)」と呼ばれる量子状態検出手法を用いて実現された。これに対し $^{115}\text{In}^+$ の 1S_0 - 3P_1 遷移は線幅が 360 kHz とスピン禁制遷移でありながら Al^+ の 530 Hz より比較的大きく、この遷移を利用した量子状態の検出が可能である。これにより QLS を用いることなく、より簡易なシステムでの周波数計測を実現することができる。

$^{115}\text{In}^+$ はこれらの特性から、光時計の最初の提案から候補に挙げられたイオン種であった。2000 年代前半には光コムの発明に伴って $^{115}\text{In}^+$ イオン時計遷移周波数計測も行われた。しかし NICT が時計遷移周波数の計測を実現するまで周波数値の報告を行ったのは 2 グループのみであった [10][11]。しかもその精度は 10^{13} にとどまり、なおかつ 2 つの報告値はその不確かさを超えて 1 kHz の差があり、事実上、時計遷移周波数の絶対値は未決状態であった。2017 年に NICT が 10^{15} 台の新たな計測を行い、これが不確かさの範囲内で過去の報告値の 1 つと不確かさの範囲内で一致した [12]。これに伴って 2003 年以降更新されなかった $^{115}\text{In}^+$ 時計遷移の国際度量衡委員会 (CIPM) の定める周波数推奨値 (1 267 402 452 901 050 (20) Hz) が NICT の報告値 (1 267 402 452 901 049.1 (6.9) Hz) とほぼ一致する値で更新がなされた。この詳細については 3.1 で解説する。

現在までに開発されているイオン光時計はすべて単一イオンを対象にした周波数計測を行っている。複数回の試行を伴った電子シェルピング法により励起確率を計測する単一イオン光時計は、多数の原子を用いて一度に励起率を計測する光格子時計よりも周波数値の計測に時間がかかり周波数安定度の面で劣る。「複数

イオン光時計」が実現できれば、この安定度の欠点を補い、イオン時計に新たなブレークスルーを与えることが期待される。 $^{115}\text{In}^+$ イオンは以下のような理由から多数個での周波数計測が可能であり、「複数イオン光時計」の実現に最も有力な候補である。

- 電気四重極シフトを受けないため、複数のイオンを同時にトラップしてもお互いのイオンがつくる電場の影響を受けない。
- 磁場や黒体輻射などの影響が小さいため、計測されるイオンがある程度空間的に広がって分布していても、その位置の違いによる周波数シフトの影響は小さい。
- 1S_0 - 3P_1 遷移を利用した直接量子状態検出が可能なので、多数化したときの量子状態検出が容易である。

1.5 Ca^+ イオンとの共同冷却

In^+ イオンは 1S_0 - 3P_1 遷移は線幅が 360 kHz であり、量子状態検出には利用できるものの、レーザー冷却速度は線幅数十 MHz の遷移を利用できる原子種と比較すると 2 桁ほど低い。特にイオンをトラップにロードするときには、高い初期速度でドップラー広がりを持った状態を単一周波数のレーザーで冷却するのは困難である。しかし、前述のとおり In^+ イオンは四重極シフトに鈍感であることから、他のイオンと同時にトラップすることが可能である。この性質を利用し、本研究では Ca^+ イオンと同時にトラップし、レーザー冷却された Ca^+ イオンによる共同冷却で In^+ を冷却する。

トラップ電極に関しては次節にて解説するが、トラップされた複数個イオンは 1 次元の線上に並ぶことになる。トラップされた単一イオンのトラップ周波数は高周波 (RF) 場の場合はイオンの質量に反比例して、静電場の場合は質量の平方根に反比例する。複数のイオンがトラップされたとき、イオンは各々の質量と配列に依存した「集団振動モード」で振動する。表 2 に Ca^+ と In^+ をトラップした場合の集団振動モード周波数を示した。表で示すとおり、2 つの Ca^+ と 1 つの In^+ をトラップした場合、 In^+ の位置に依存してモード周波数が異なる。これを利用して特定の配列の時だけトラップイオンを大きく揺さぶり結晶状態を崩壊させることが可能で、この手法を用いて配列の制御を行うことができる [13]。

2 実験装置

2.1 トラップ電極

In^+ イオン光時計では linear-Paul トラップと呼ばれ

4 原子周波数標準

表2 $^{40}\text{Ca}^+$ 及び $^{115}\text{In}^+$ 混合トラップの集団振動モード周波数比
単一 $^{40}\text{Ca}^+$ のトラップ周波数を基準とした。

集団振動周波数 / Ca^+ トラップ周波数			
Ca^+	1.000		
In^+	0.577		
$\text{Ca}^+ - \text{Ca}^+$	1.000	1.732	
$\text{Ca}^+ - \text{In}^+$	0.684	1.492	
$\text{Ca}^+ - \text{Ca}^+ - \text{Ca}^+$	1.000	1.732	2.408
$\text{Ca}^+ - \text{In}^+ - \text{Ca}^+$	0.761	1.732	1.869
$\text{Ca}^+ - \text{Ca}^+ - \text{In}^+$	0.740	1.434	2.317

る電極を用いる。イオントラップでは、アーンショーの定理より静電場でポテンシャルの極小点を作ることができないため、交流場を利用して疑似的な極小点を実現する。linear-Paulトラップでは動径方向の2次元を交流電場で閉じ込め、軸方向の1次元を静電場で閉じ込める。周波数計測への応用を前提とした場合、交流電場でのトラップは電場鞍点でのみ可能で、それ以外の場所ではACシュタルクシフトと微細振動によるドップラーシフトを受けるため適切ではない。linear-Paulトラップは交流電場の鞍点が線上に存在するので、複数のイオンをトラップした状態での計測が可能で、共同冷却を実現することができる。

図2右は本グループが開発したイオントラップ電極である。電極は加熱効果を軽減するため熱伝導率の高いベリリウム銅を使用した。また、ステンレス製トラップ電極を使用した際、紫外線ビームの影響で、電極表面が帯電しトラップイオンの位置がずれるなどの現象が観測されたが、効果を抑制するため金でコーティングを施した。時計遷移計測時はRF電極に30 MHzの交流電圧を1 kVppで印加し、静電場電極に500 Vの電圧を印加して使用する。この交流・直流電圧の印加により Ca^+ が受けるトラップ振動周波数は動径方向で $2\pi \times 4.0$ MHz、軸方向で $2\pi \times 500$ kHzであった。前節で記述したとおり、軸方向のトラップ周波数はイオンの数・質量・配列に依存した集団振動

周波数となるため、表2で示した周波数比を掛けることで実際のトラップ周波数が得られる。

2.2 レーザー光源

In^+ の周波数計測には波長 237 nm の時計遷移光と波長 230 nm の検出光が必要となる。この2つの光は共に深紫外領域にあり、これらの波長で周波数計測に利用できる狭線幅レーザーは無く、第二次高調波発生(SHG)などの波長変換技術を用いる必要がある。本研究では各レーザーの周波数安定化及び光周波数コムを用いた周波数計測を行うという理由から、各々の4倍の波長にあたる 946 nm 及び 922 nm の外部共振器型半導体レーザー(ECDL)でレーザー光を発振し、SHGによる波長変換を二段階行って該当波長の光を得る。

図3に各々のレーザー系のセットアップを示す。時計レーザーは精密な周波数制御が要求されるため、超低膨張ガラス(Ultra Low Expansion, ULE)を用いたフィネス 320 000 の共振器に対して安定化させる。ULEは特定の温度で1次の熱膨張係数がゼロとなる性質があり、その温度で共振器に使用した際に周波数の変化が極めて小さくなる。ECDLから発振されたレーザー光はテーパ型増幅器(Tapered Amplifier, TA)で1 Wに増幅され、そのうち一部を分岐させ周波数安定化に用いる。周波数安定化を行うULE共振器に光を送る過程で、複数の音響光学素子(Acousto-Optic Modulator, AOM)を使用し、そのオフセット周波数を制御することでレーザーの周波数制御に利用する。周波数計測を行う際、周波数制御には主に(1)周波数スキャンなどの意図した操作と、(2)共振器のドリフトなどの周波数変化を補正するための制御の2通りが存在する。光周波数コムで計測する際、計測される光は(1)の制御とは独立で、(2)の補正のみを受けていることが望ましい。そこで図3に示しているとおり、光コムに送るポートをAOM1透過後に作り、計

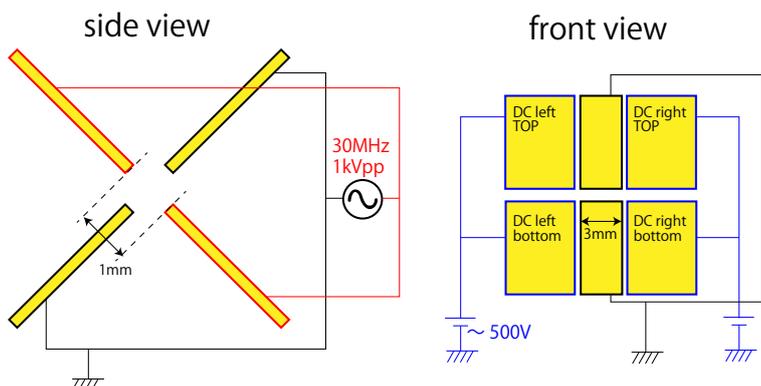


図2 linear-Paulトラップ電極概略図(side view, front view)及び実際に作製した電極の写真

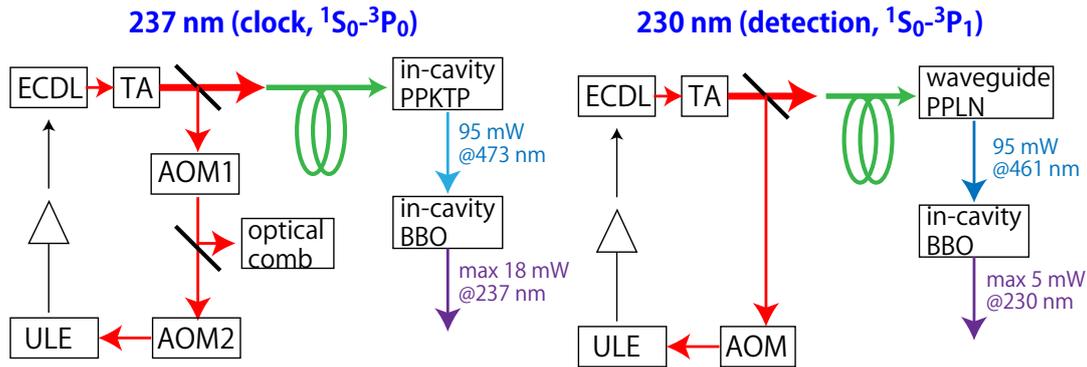


図3 時計遷移光（波長 237 nm）と検出光（波長 230 nm）の発生システム

測される周波数は AOM2 の影響を受けるが AOM1 の影響は受けないような構造にした。本研究で開発した時計レーザーは、線幅を 1 Hz 程度に抑えることができた。また ULE 共振器の経年ドリフトは 0.05 Hz/s 以下であり、これを、AOM2 を利用し打ち消すように周波数を動かすことで極めて安定なレーザーとなった。

TA で増幅されたレーザー光は、イオントラップチャンバーと同一の光学定盤内に置かれた波長変換システムに送られる。この波長変換システム内にある Periodically Poled KTP (PPKTP) 結晶共振器に 200 mW 入射し、最大で 95 mW の波長 473 nm 光を得ている。これに続き BBO 結晶共振器に入射させることで最大 18 mW の出力を得た。得られたビームは $\lambda/2$ 波長板や偏光ビームスプリッター (PBS) で強度を調整し、最終的に $2 \mu\text{W}$ 程度をイオンに照射する。

検出光についても同様に ULE 共振器に対して安定化している。しかし、この検出に用いる遷移は線幅が 360 kHz と比較的大きく、時計遷移ほどの精密な周波数制御は必要とされないうえに、周波数を原子蛍光から確認することができるので光周波数コムでの確認も必要ないため、図 3 のような簡潔な構成となっている。波長 922 nm の基本波からの波長変換は、時計遷移光と同様の構成となっているが、初段の第二次高調波発生には導波路型 Periodically Poled Lithium Niobate (PPLN) 結晶を利用した。波長 230 nm のビームは最大で 5 mW ほど得られているが、蛍光強度の飽和には $100 \mu\text{W}$ 程度の入射で十分である。それ以上の入射は電極等からの散乱を増やすことになり、量子状態検出における背景信号となる。

2.3 時計遷移観測システム

実験装置を図 4 に示す。イオントラップ電極は 10^8 Pa の超高真空槽に設置されており、 Ca^+ と In^+ はその中で捕捉する。それぞれロード時に必要となるイオン化レーザーはフリップミラーで照射の on/off を

コントロールし、各々のロードの時のみ照射する。 Ca^+ は波長 397 nm と 866 nm の半導体レーザー光でレーザー冷却され、これが冷媒イオンとなって In^+ を共同冷却する。レーザー冷却された Ca^+ は波長 397 nm の共鳴蛍光光子を放ちこれを 800 mm 離れた場所に設置したイメージインテンシファイア CCD カメラ (ICCD) で結像しその様子を観測する。

In^+ の時計遷移観測には前節で述べた波長 230 nm の検出光と波長 237 nm の時計遷移光が必要になる。この 2 つのビームは PBS で直交した偏光にて重ね合わせ、イオンに照射する。直交した 2 つのビームはチャンバー照射直前に置いた $\lambda/4$ 波長板で円偏光に変換する。本実験装置では 2 通りの偏光の組合せを用いる。1 つは、リニアトラップの軸方向 (図の上下方向) を量子化軸として取ったときの、 σ^+ 偏光 230 nm ビームと σ^- 偏光 237 nm ビームで、ここでは偏光 Set+ と呼ぶこととする。また逆に σ^- 偏光 230 nm ビームと

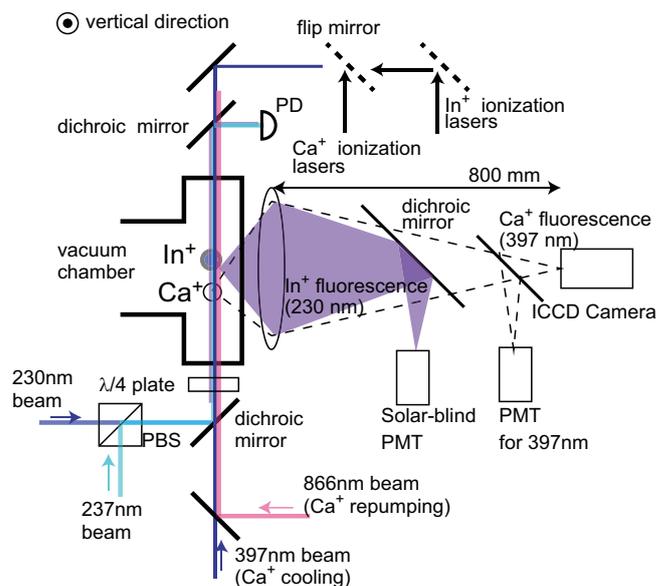


図4 時計遷移観測システムの光学系概略図

PMT は光電子増倍管、ICCD はイメージインテンシファイア CCD カメラ、PD はフォトダイオード、PBS は偏光ビームスプリッターを表している。

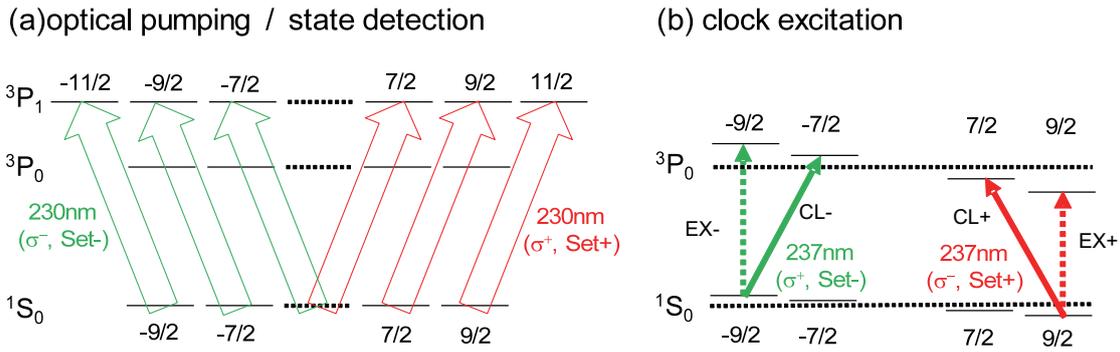


図5 検出遷移光・時計遷移光照射時に誘起される遷移
 (a) 偏光 Set ± の時 optical pumping の効果でイオンは $m_F = \pm 9/2$ 状態に遷移する。
 (b) pumping 後に引き続き時計遷移光を照射することで、それぞれ図中の CL ± 遷移を誘起する。

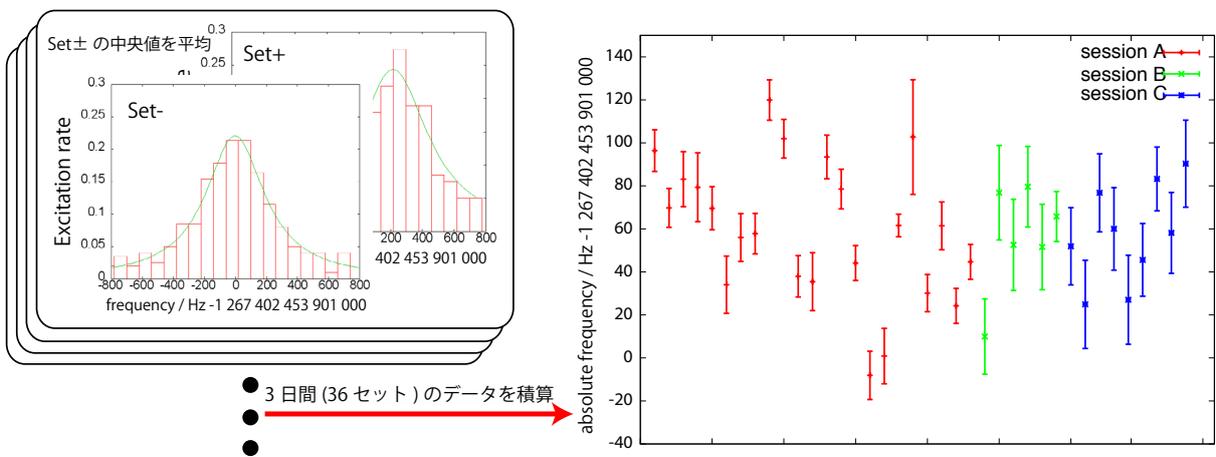


図6 スペクトル計測による絶対周波数の測定
 Set+ と Set- の偏光で得られたスペクトルの中心値を平均し、それを 36 セット分積算した。Session A,B,C はそれぞれ 3 日間の計測日に対応する。

σ^+ 偏光 237 nm ビームの組合せを偏光 Set- とする。偏光 Set+ では 230 nm 光の照射により光ポンピングの効果により $m_F = +9/2$ に初期化した後、 σ^- 偏光の波長 237 nm のレーザーにより図 5 に示した CL + 遷移が励起される。また偏光 Set- により CL - 遷移が励起される。次節で記述するとおり、本計測ではこの 2 つの遷移を利用し周波数計測を行う。これらの偏光の組合せは、 $\lambda/4$ 波長板をマウントした自動回転ステージの制御で簡単に切り替えることができる。

In^+ の共鳴蛍光光子は ICCD の量子効率の違い及び焦点距離の違いから Ca^+ 共鳴蛍光光子を撮影する ICCD の像上では検出されず、 In^+ は光らないスポットとして認識される。そのため、その量子状態は 230 nm の蛍光光子を用いて別に設置した深紫外領域のみに感度を持つ光電子増倍管 (PMT) で測定する。

3 時計遷移周波数の計測

3.1 副準位縮退状態でのスペクトル計測

磁気量子数量子化軸射影成分 m_F がゼロとなるゼー

マン副準位を持つ原子種では、 $m_F=0$ の下準位から $m_F=0$ の上準位への 1 つの遷移から時計遷移周波数が得られる。 In^+ は $m_F=0$ の副準位を持たないので、どの準位も僅かな磁場で周波数シフトを起こしてしまう。そこで仮想的に定義される時計遷移周波数を中心に対称に配置する 2 つの遷移の平均として時計遷移周波数を得ることができる。2017 年に行った NICT における最初の In^+ 光時計遷移周波数計測として、前述の Set+ と Set- で得られたスペクトルの中心値を平均することでその中心値の決定を行った。この時の計測では 3 日間で合計 36 セットのスペクトルを計測し、図 6 に示すデータを得た。

図 7 に過去に報告された $^{115}\text{In}^+$ 光時計遷移周波数と図 6 のデータを平均して得られた値の比較を示す。本計測で得られた周波数は 1 267 402 452 901 049.9 (6.9) Hz で 2007 年に参考文献 [11] で報告された値と不確かさの範囲で一致した。また、この計測値をもって 2017 年に CIPM の推奨値の更新に貢献した。

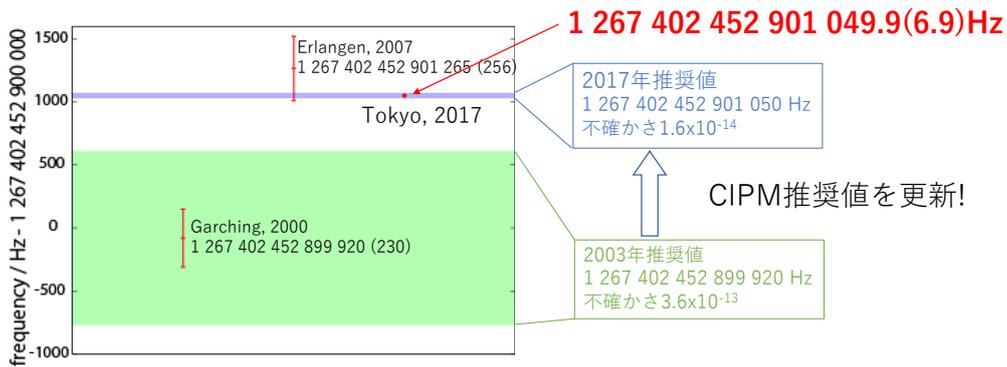


図7 過去に報告された周波数値と本計測値の比較

Garching, 2000 及び Erlangen, 2007 はそれぞれ参考文献 [10] 及び [11] の報告値を示す。緑の帯は 2003 年に決定された CIPM 推奨値の 1σ の範囲を示し、青の帯は改定された推奨値の 1σ の範囲を示す。

3.2 磁場印加による副準位の分離

前節の計測では、 3P_1 準位の分裂し光ポンピングが阻害されることを避けるために、低磁場環境で計測を行う必要があった。このため、すべての副準位からの遷移が非分離な状態での観測となった。この方法では僅かな磁場の影響でスペクトルが広がり、また不完全な光ポンピングにより、意図しない遷移が重なって観測されることで、スペクトルの中心値がシフトしてしまう。このため、表3で示すとおり磁場による周波数シフト（一次ゼーマンシフト）の不確かさが全体の不確かさを支配していた。より高い分解能で、かつ磁場による不確かさを減らすためには副準位の分離が不可欠である。 3P_1 準位の分裂を伴わずこの問題を解決するために、磁場のパルス印加を行った。図8に時計遷移周波数計測時の時計遷移光・検出光・ In^+ 蛍光カウントゲート・ Ca^+ 冷却光・軸方向磁場のタイミング系を示す。図で示されているとおり、軸方向磁場は時計遷移光を照射したときのみ印加する。これにより検出光照射のタイミングでは強い磁場は印加しないので 3P_1 準位は分裂せず、光ポンピングが行える。図9に

表3 各要因におけるシフトとその系統不確かさ [12]

	シフト /Hz	不確かさ /Hz
一次ゼーマンシフト	0	4.6
二次ゼーマンシフト	0	<0.1
時計レーザーによる周波数シフト	0	0.1
黒体輻射シフト	0	<0.1
二次ドップラーシフト (secular 運動)	0	0.7
二次ドップラーシフト (micromotion)	0	0.4
重力シフト	10.5	<0.1
合計	10.5	4.7

パルス磁場印加によって得られたスペクトルを示す。各々のスペクトル線幅は 80 Hz で、前節で記述した副準位が非分離な状態での計測における線幅 (500 Hz) と比較すると、1/5 以下である。

3.3 ロック動作による周波数の安定化

一般的に光時計は時計レーザーを継続的に時計遷移に周波数ロックさせることによって安定な光周波数を生成する。本節では In^+ を用いた初の周波数ロック動作について述べる。前節で示した遷移 $CL \pm$ を周波数基準として用いる。遷移 $CL \pm$ のスペクトル全体を観測するとフィードバック周期が長くなってしまうため、スペクトルの肩の2点での遷移確率を観測する。この2点の励起確率の差を誤差信号として利用し、時計レーザーのドリフトを検出し制御する。協定世界時に準拠する UTC (NICT) にリンクした水素メーザー、または光格子時計 (NICT-Sr1) を周波数基準としてイッテルビウム (Yb) ファイバー光コムで周波数安定度と

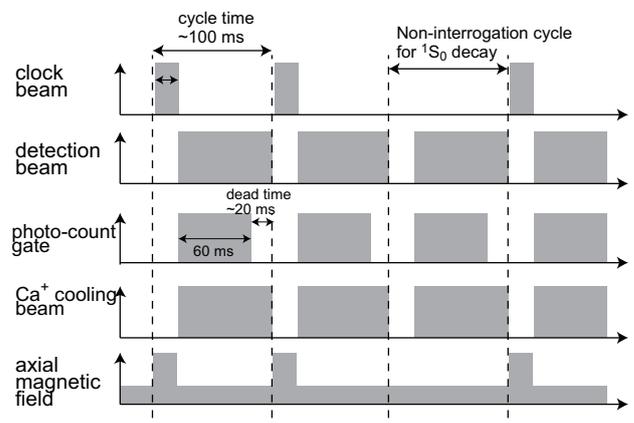


図8 時計遷移周波数計測システムの timing table。20 ms の時計遷移光照射に同期して磁場を印加する。

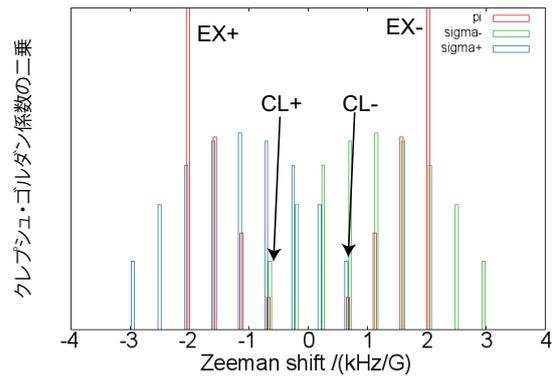
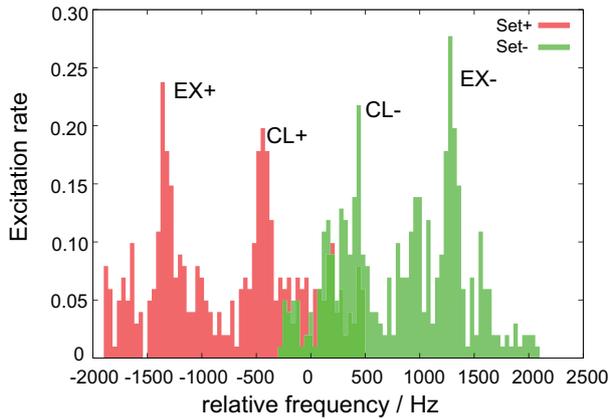


図9 パルス磁場の印加により Zeeman 分裂したスペクトル (左) 及び各々に対応する遷移強度 (右)

絶対周波数の評価を行う。

時計レーザー ULE 共振器の周波数ドリフトに起因する周波数誤差を除くため、時計レーザーの周波数制御には 1000 秒ごとの周波数ドリフト補正を付加した。CL ± の遷移についてそれぞれ 2 点ずつの合計 4 つの周波数について、前節で述べた観測サイクルを 100 回行うことにより励起率を算出し時計レーザー周波数へのフィードバックを行った。フィードバック周期はこの観測サイクルの総計で与えられ、現在の装置ではおおよそ 70 秒である。光コムで計測した周波数安定度を図 10 に示す。フィードバック周期以下の積分時間での安定度は単独での時計レーザーの安定度を示している。水素メーザーを基準とした測定では、短い積分時間では水素メーザー自身の不安定さが支配的となり、長い積分時間での測定のみが意味を持つ。フィードバック周期以上の積分時間での測定結果が In⁺ 時計遷移に周波数ロックした時計レーザーの周波数安定度を示す。時計遷移への安定なロック動作は繰り返し行った実験で確認されたが、安定度計測では積分時間が

1000 秒以上となってようやく安定度が向上するのが観測された。安定度が向上する積分時間がこのようにフィードバック周期より長い問題は、フィードバック定数の最適化や、励起確率増強によるフィードバック周期短縮化で改善が期待される。フィードバック定数の最適化を施さない現在の状態でも測定した安定度は 4000 秒の積算時間で 1.5×10^{-15} に到達している [14]。

4 まとめと今後の展望

NICT における ¹¹⁵In⁺ イオン光時計開発について報告した。¹¹⁵In⁺ イオン光時計遷移周波数の先行研究における報告値は 2 つのみ (2000 年 [10]、2007 年 [11]) で、その値が各々の不確かさの 5 倍ほど離れており、事実上未決状態であったが、本グループの報告した周波数値がその一方と一致することで解決された。この周波数値の報告によって、国際度量衡委員会 (CIPM) の定める ¹¹⁵In⁺ イオン光時計遷移周波数の推奨値がそれまでよりも不確かさが 1/20 以下の値へと改定された。また 2017 年の計測に続く時計システムの改良で、 10^{-16} 台の計測が可能となった。

現在では参照信号である水素メーザーの安定度に依存しない計測を行うために、Sr 光格子時計の時計レーザーと光コムを介した周波数比較を行っている。より高精度の計測が可能となり 10^{-16} 台前半の確度での計測ができるようになると、In⁺ の時計遷移周波数を「秒の二次表現」の候補となる可能性が期待される。現在「秒の二次表現」にはイオン標準で 4 つ (²⁷Al⁺, ¹⁹⁹Hg⁺, ⁸⁸Sr⁺, ¹⁷¹Yb⁺)、中性原子で 3 つ (¹⁷¹Yb, ⁸⁷Sr, ¹⁹⁹Hg) の合計 7 つの原子の持つ光学遷移が含まれている。本グループでは In⁺ の時計遷移をこの「秒の二次表現」に追加することを目指していく。

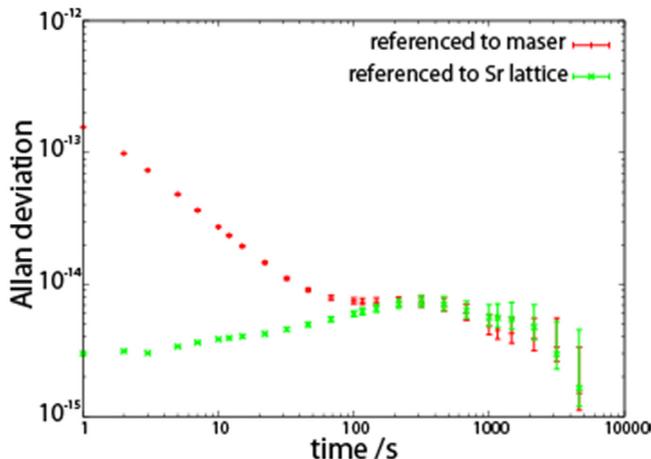


図 10 時計レーザーのアラン分散

赤で示した点が水素メーザーを基準として計測したものを示し、緑の点は Sr 光格子時計を基準にした計測を示す。

【参考文献】

- 1 H. Dehmelt, IEEE Trans. Instrum. Meas., IM-31, 83, 1982.
- 2 蜂須英和 他, 情報通信研究機構研究報告, “ストロンチウム光格子時計の周波数比較及び時系生成への応用,” vol.65, no.2, 4-5, 2019.
- 3 K. Matsubara, et. al., Opt. Express, 20, 22034, 2012.
- 4 Y. Huang, et. al., Phys. Rev. Lett., 116, 013001, 2016.
- 5 G. P. Barwood, et. al., Phys. Rev. A, 89, 050501(R), 2014.
- 6 P. Dube, et. al., Metrologia, 54, 290, 2017.
- 7 N. Huntemann, et. al., Phys. Rev. Lett., 116, 063001, 2016.
- 8 C. F. A. Baynham, et. al., Journal of Modern Optics, 65, 2018, 2017.
- 9 S. M. Brewer, et. al., Phys. Rev. Lett., 123, 033201, 2019.
- 10 J. von Zanthier, et. al., Opt. Lett., 25, 1729, 2000.
- 11 Y. H. Wang, Opt. Commun. 273, 526, 2007.
- 12 N. Ohtsubo, et. al., Optics Express, 25, 11725, 2017.
- 13 K. Hayasaka, Appl. Phys. B, 107, 965, 2012.
- 14 N. Ohtsubo, et. al., Hyperfine Interactions, 240, 39, 2019.



石島 博 (いしじま ひろし)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員



早坂和弘 (はやさか かずひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 先端開発センター
研究マネージャー
博士(理学)
量子エレクトロニクス、量子光学、
光周波数標準



大坪 望 (おおつぼ のぞみ)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究員
博士(学術)
量子エレクトロニクス、光周波数標準



井戸哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
時空標準研究室
室長
博士(工学)
光周波数標準、光周波数計測



李 瑛 (り いん)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員
博士(理学)
光周波数標準、レーザー物理



松原健祐 (まつばら けんすけ)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究マネージャー
博士(理学)
周波数標準、標準時、レーザー分光



Nils Nemitz (にるす ねみっつ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
Dr. rer. nat.
光周波数コム、光周波数標準、標準時



蜂須英和 (はちす ひでかず)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
光周波数標準、光格子時計とその応用