

光格子時計の研究開発状況と応用に関する調査研究

小林拓実*

(平成 28 年 3 月 31 日受理)

A survey on the status and applications of optical lattice clocks

Takumi KOBAYASHI

Abstract

Uncertainties of optical lattice clocks have recently reached the 10^{-18} level. Optical lattice clocks are therefore expected to contribute to the redefinition of the SI second. This report reviews the current status of research and development of optical lattice clocks, and their applications for geodesy and fundamental physics.

1. はじめに

古来より人類は自然界に存在する様々な周期的現象を利用して時間を測定してきた。時間を測る目的は、例えば、適切な時期に種を蒔き収穫を行うため、安全な航海のため、大量のデータを高速通信するため等、時代背景や科学技術の発展とともに変わってきた。時間を測る道具「時計」は、日時計、振り子時計、水晶時計、原子時計など、多種多様なものが発明され、時間を測る目的に応じた精度と利便性が追求されてきた。これらの時計に使われる技術はそれぞれ異なるが、

- a) 振動子
- b) 基準
- c) 周波数カウンター

という 3 つの基本要素から構成されている点で一貫性がある。振り子時計では、a) は振り子、b) は古い定義では地球の自転、c) は文字盤であった。最先端の科学技術を結集した光時計（光周波数を用いた原子時計）では、a) はレーザー、b) は原子の遷移周波数、c) は光周波数コム（第 2 節参照）を含む光周波数計測システムである。一般に、レーザーの短期周波数安定度は極めて良いが、長期で見ると周波数が動く傾向にある。長期的にも周波数が変化しない基準として、これまで中性原子やイオン

の遷移周波数が用いられてきた。最近の光時計は、現在の秒の定義を実現する Cs 原子時計よりも小さな不確かさが実証されており、光時計による秒の再定義が確かなものになりつつある。本稿では、光時計の 1 つである光格子時計の研究開発状況および将来の応用に焦点を絞って調査したことを報告する。

第 2 節で原子時計の歴史と現状について述べる。第 3 節では光格子時計の原理、第 4 節では、不確かさ 10^{-18} 台の光格子時計の開発に必要なことを述べる。第 5 節では、光格子時計による秒の再定義、測地学分野、基礎物理学への応用について述べる。

2. 原子時計の歴史と現状

原子時計の研究は、1940 年頃の重水素ビームのラーモア周波数測定¹⁾に始まる。その後 1950 年代に、Cs 原子ビーム時計が、初めて原子時計として開発された²⁾。1967 年に国際度量衡総会（Conférence Générale des Poids et Mesures: CGPM）で、¹³³Cs 原子のマイクロ波遷移周波数約 9.2 GHz が時間・周波数標準として採用され、現在まで秒の定義になっている。また、1990 年代に、原子泉方式の Cs 原子時計が開発された³⁾。

時計を評価する指標として周波数安定度がある。周波数安定度を定量化する尺度として、アラン偏差という量がしばしば用いられる。原子時計では、短期の安定度に

*物理計測標準研究部門時間標準研究グループ

関しては、ショットノイズが重要であり、その領域におけるアラン偏差は近似的に

$$\sigma_y(\tau) \sim \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N\tau}}, \quad (1)$$

と表せる⁴⁾。ここで、 ν_0 、 $\Delta\nu$ 、 N 、 τ はそれぞれ発振周波数、基準としている原子遷移の線幅、原子数、積算時間である。この式から、同じ $\Delta\nu$ に対して、 ν_0 が大きければアラン偏差が小さくなる（安定度が良くなる）ことが分かる。そのため、発振周波数を上げることが、安定度の向上につながる。Cs 原子時計の場合、約 9.2 GHz のマイクロ波が発振周波数であるが、これを光周波数である 1 PHz (10^{15} Hz) 程度まで上げることができれば、安定度の 5 桁向上が期待できる。1999 年までは光周波数を簡便に測定する手法は存在しなかったが、光周波数コム^{5),6)}の技術の確立により、光周波数計測が比較的容易になった。これにより、光周波数を用いた原子時計（光時計）の研究が加速的に進み、Cs 原子時計よりも高性能な光時計が実現されるようになった。

原子時計は、止まっている原子が無摂動状態にあるときの遷移周波数を基準にする。そのため、いかに熱運動する原子の動きを止め、原子に対する外部摂動を減らすかが重要になる。これを実現するため、代表的な 2 種類の光時計では、ラム・ディッケ束縛⁷⁾と呼ばれる原子を強く束縛・冷却した状態を利用している。1 つは単一イオン時計⁸⁾、もう 1 つは光格子時計である。単一イオン時計では、イオン 1 個を高周波で駆動する四重極電場の中心に捕獲し、ラム・ディッケ束縛状態を作る。電場のゼロ点でイオンを捕獲するため電場による摂動を最小限に抑えられる、単一なので基準となるイオン同士の衝突が存在しない、といった利点がある。一方で、式 (1) より、単一 ($N=1$) であるため、小さな不確かさを得るためには長い積算時間が必要になる。アメリカ国立標準技術研究所 (National Institute of Standards and Technology: NIST) の Al^+ イオン時計⁹⁾は、不確かさ 8.6×10^{-18} を達成しているが、この不確かさを得るのに約 2 日もの積算時間を要している。

光格子時計では、レーザーの作る定在波に中性原子を捕獲し、ラム・ディッケ束縛状態を実現している。定在波の作る格子状のポテンシャル「光格子」中に、多数の原子を捕獲することが可能で、単一イオン時計に比べて、短時間で小さな不確かさを得ることができる。光格子時計のアイデアは 2001 年に東京大学の香取により提案され¹⁰⁾、2005 年に実証実験に成功した¹¹⁾。ここ 10 年で、世界中で光格子時計の研究が進められてきた。最近、アメリカ JILA と理化学研究所（理研）で 10^{-18} 台の不

確かさが実証され¹²⁾⁻¹⁴⁾、光格子時計は次世代の時間・周波数標準の有力な候補になっている。

図 1 に各種周波数標準の不確かさ低減の歴史をまとめる。図中で、青点は Cs 原子時計、緑点は光時計を示す。また、各緑点のそばには、基準として用いられた中性原子およびイオンを示している。後発の光周波数標準の不確かさが急速に低減して、Cs 原子時計を凌駕していることが分かる。

3. 光格子時計の原理

光格子時計の原理および主要な装置に関しては、安田¹⁶⁾、保坂¹⁷⁾、赤松¹⁸⁾の報告が詳しい。本稿では簡潔に述べる。

光格子による原子の捕獲は、レーザー電場により原子に誘起された電気双極子とレーザーとの相互作用を利用している。レーザー電場 E によって原子が感じるポテンシャル V は

$$V = -\frac{1}{2} \alpha E^2, \quad (2)$$

と書ける。ここで α は分極率である。 α が正の場合、原子はレーザー強度の強い場所に引き寄せられる。対向する 2 本のレーザーによって定在波（光格子）を作れば、レーザー強度が極大となる位置に原子が捕獲される。

光格子に捕獲された原子の遷移周波数 ν_{clock} は

$$\nu_{\text{clock}} = \nu_0 - \frac{1}{2\hbar} (\alpha_e(\lambda_L) - \alpha_g(\lambda_L)) E^2, \quad (3)$$

と表せる。ここで、 α_g 、 α_e はそれぞれ基底、励起状態の分極率、 λ_L はレーザーの波長、 \hbar はプランク定数である。この式は、無摂動の原子の遷移周波数 ν_0 に対して、上下

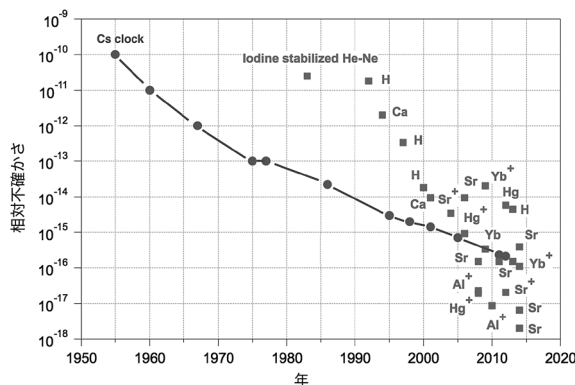


図 1 各種周波数標準の不確かさ低減の歴史。丸点は Cs 原子時計、四角点は光時計を示す。H. Margolis¹⁵⁾等の図をもとに最近のデータを加えたもの

準位のポテンシャルの差に対応した周波数シフト項が加わることを示している。これは光シフト (AC Stark シフト) と呼ばれている。第2節で述べたように、原子時計は ν_0 を基準にするため、光シフトを消す必要がある。ここで、ある特定の原子種については、

$$\alpha_e(\lambda_{magic}) = \alpha_g(\lambda_{magic}), \quad (4)$$

となる波長 λ_{magic} が存在し、式(3)の第2項をキャンセルできる¹⁹⁾。 λ_{magic} は魔法波長と呼ばれており、Sr光格子時計では約813 nm、Yb光格子時計では約759 nmである。

4. 不確かさ 10^{-18} 台の光格子時計の開発

原子を取り囲む室温環境からの黒体輻射が、原子に摂動を与え、遷移周波数をシフトさせることが知られている。Sr光格子時計では、絶対零度と室温の環境下における周波数シフトが約-2 Hz (相対周波数 10^{-15})である。最近のJILAと理研の不確かさ 10^{-18} 台の時計の実証は、主に室温の黒体輻射に起因する不確かさの低減により成し遂げられた。ここでは、その部分に焦点を絞って述べる。その他にも不確かさ 10^{-18} 台を実現するために、さまざまな評価が行われたが、文献(20)~(22)を参照。

熱平衡状態にある黒体輻射のスペクトルは、プランクの公式より

$$u_T(\omega) = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3}{\exp(\hbar\omega/k_B T) - 1}, \quad (5)$$

となる。ここで、 c は光速、 \hbar はディラック定数、 k_B はボルツマン定数である。 $u_T(\omega)$ を周波数 ω について積分したものが温度 T における黒体輻射の電磁波強度に相当する。黒体輻射による周波数シフト ν_{BBR} (黒体輻射シフト)は以下の式から計算できる。

$$\nu_{BBR} = -\frac{1}{2\hbar\epsilon_0} \int_0^\infty \Delta\alpha u_T(\omega) d\omega. \quad (6)$$

ここで、 $\Delta\alpha = \alpha_e - \alpha_g$ は上下準位の分極率の差である。 $\Delta\alpha$ を周波数に依存する成分の項と依存しない項に分け

$$\Delta\alpha(\omega) = \Delta\alpha(\omega=0) + \Delta\alpha'(\omega), \quad (7)$$

とする。 $\Delta\alpha(\omega=0)$ だけを考えると、

$$\begin{aligned} \nu_{BBR} &= -\frac{1}{2\hbar\epsilon_0} \Delta\alpha_0 \int_0^\infty u_T(\omega) d\omega \\ &= -\frac{1}{2\hbar\epsilon_0} c_1 T^4, \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 $c_1 = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 \hbar^3}$ はステファンボルツマン定数である。第一次近似において、黒体輻射シ

フトは T^4 に比例し、その不確かさは T^3 の依存性を持つ。ドイツ物理工学研究所 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt: PTB) で評価したSr原子の黒体輻射シフトの温度依存性は、 T^6 の高次項を加えて、

$$\nu_{BBR}(T) = \nu_{stat}(T/T_0)^4 + \nu_{dyn}[(T/T_0)^6 + O(T/T_0)^8], \quad (9)$$

ここで、 $\nu_{stat} = -2.13023(6)$ Hz, $\nu_{dyn} = -147.6(23)$ mHz, $T_0 = 300$ Kである²³⁾。()内の数値は標準不確かさを表す。

JILAでは、室温で環境温度を精密に測定し、黒体輻射シフトの精密評価を行った^{12),14)}。原子を捕獲する真空チェンバー全体を箱で覆い、外部からの輻射を遮断した。真空チェンバー内部の温度は、NISTの温度標準にトレーサブルなシリコン半導体温度センサー2つを用いて測定した。1つのセンサーは捕獲されている原子から2.54 cm離れた場所に固定し、時計運転時のリアルタイムモニターとして使った。もう1つのセンサーは、チェンバー内で位置を動かすことができ、時計の運転を停止している間に、チェンバー内の温度勾配の測定に用いた。このようなやり方で測定した温度の不確かさは26.7 mKで、これが遷移周波数の不確かさ 10^{-18} 台に対応する。理化学研究所では、環境温度を低温に冷却することで、黒体輻射の影響を低減した¹³⁾。スターリング冷凍機を用いて95 Kに冷却したクライオチェンバーを用意した。クライオチェンバーには直径0.5 mmと1 mmの穴があり、光格子を移動させることによって、捕獲されている原子をチェンバー内に移動した。95 Kにおける黒体輻射シフトは-22 mHzである。温度測定の不確かさ0.5 K程度で、遷移周波数の不確かさ 10^{-18} 台に対応する。

現時点で、黒体輻射の影響を低減し、不確かさ 10^{-18} 台を達成したのは、JILAと理研の2研究機関のみだが、複数の研究機関で同程度の不確かさを実証することは重要である。例えば、NISTでは、JILAと同様の方法を用いた光格子時計を開発中である²⁴⁾。その他の研究機関でも、JILAまたは理研の方法を使って、黒体輻射の影響の低減を目指した研究開発を行っている。

黒体輻射の影響を低減後、不確かさ 10^{-19} 台を追求する際に、高次の光シフトによる不確かさが支配的になることが分かっている²⁵⁾。光シフトは式(3)に示したように電場の2乗に比例することを述べたが、これは電気双極子(E1)のみを考慮した場合である。 10^{-18} 台よりも小さな不確かさを議論する場合、高次の分極率の寄与、電気四重極(E2)、磁気双極子(M1)等が無視できず、 E 、 E^3 、 E^4 に比例する項が現れる。

5. 光格子時計の応用

5.1 秒の定義改訂

第2節で述べたように、光時計は、現在の秒の定義を実現する Cs 原子時計の性能を上回っており、秒の定義改訂は確かなものになりつつある。ここでは、秒の定義を実現する一次周波数標準器から時系が作られる仕組みと、秒の定義改訂に向けた動きについて述べる。

国際原子時 (International Atomic Time: TAI) および協定世界時 (Coordinated Universal Time: UTC) と呼ばれる時系が、パリにある国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures: BIPM) によって維持、供給されている。まず、世界各国約 70 の計量標準研究所などの機関の約 400 台の原子時計 (主に商用 Cs 原子時計や水素メーザー) の時刻差のデータが BIPM に報告され、各時計の加重平均で自由原子時 (Echelle Atom-ique Libre: EAL) という時系が作られる。離れた場所にある時計の時刻差は、人工衛星を介して信号を送った際の信号の到達時間を用いて求める。EAL の周波数安定度は 30-40 日平均で約 4×10^{-16} になる。次に、一次周波数標準器の過去 1 年間の測定結果をもとに、EAL と SI 秒 (一次周波数標準器によって決められる) の差が計算され、周波数の微調整を行った後に、TAI がつくられる。現在、8 研究機関の 11 台の原子型 Cs 原子時計が TAI の校正に使われており、周波数の不確かさは約 3×10^{-16} である。UTC は、TAI にうるう秒を足すことで作られる。また、各国の研究機関 k で、UTC (k) と呼ばれる現地版 UTC が作られており、その地域の時間の基準として使われている。BIPM は、毎月 1 回、先月分の UTC と各機関の UTC (k) との差 [UTC - UTC (k)] を 5 日間毎に分けて公表している。

BIPM は、SI 秒の再定義の準備過程として、秒の二次表現 (次世代の時間・周波数標準の候補のリスト) を定義した²⁶⁾。現在、秒の二次表現には、 ^{87}Sr 、 ^{171}Yb 、 $^{27}\text{Al}^+$ 、

$^{88}\text{Sr}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ 、 $^{199}\text{Hg}^+$ の光遷移周波数、 ^{87}Rb のマイクロ波遷移周波数が含まれる。表 1 に秒の二次表現のリストを示す。これらの周波数の値は SI 秒との比較で決定されている。秒の定義が改訂されると、原子型 Cs 原子時計に代わり、次世代の時間・周波数標準が TAI の校正を行うことになる。

現在の SI 秒との比較によって決定される光時計の周波数 (絶対周波数) の不確かさを低減することは、新しい秒の定義値への移行をスムーズに行うために重要である。光格子時計を例に挙げると、原子型 Cs 原子時計を保有している PTB とフランスの時空標準機構 (Observatoire de Paris, le Systèmes de Référence Temps Espace: SYRTE) で、 10^{-16} 台前半の不確かさで絶対周波数を決定した²⁷⁾、²⁸⁾。一方で、原子型 Cs 原子時計を保有していない研究機関のほうが多いため、その場合には、BIPM が公表する [UTC - UTC (k)] の情報を用いて、絶対周波数計測が行われてきた²⁹⁾-³¹⁾。[UTC - UTC (k)] は 5 日平均の値であるが、光格子時計を運転できる時間は現状では 1 日に数時間程度の場合が多く、光格子時計と UTC (k) の比較におけるデッドタイムによる不確かさ³²⁾が生じる。最近、情報通信研究機構と産業技術総合研究所 (産総研) では、UTC (k) よりも安定で連続運転可能な中間発振器を導入し、デッドタイムによる不確かさを低減させた³³⁾、³⁴⁾。また、現在の SI 秒との比較を行わず、光格子時計同士の比較から得られた周波数比の値 (理研、産総研などで測定³⁵⁾-³⁷⁾) が、最近、秒の二次表現の周波数の決定に寄与するようになった。

光時計の長期の連続運転技術の確立は、将来の光周波数による時系の構築に必要である。マイクロ波時計の水素メーザー等に対応する光時計が望まれている。しかし、現時点では、多数のレーザーで構成される光時計を 24 時間 365 日動作させることは困難である。最近の成果の例では、英国国立物理学研究所 (National Physical Laboratory: NPL) で、Sr 光格子時計の 25 日間で 502 時

表 1 秒の二次表現のリスト^a

| | 原子種 | 遷移 | 周波数 | 不確かさ |
|-------|---------------------|--|-----------------------------|-----------------------|
| マイクロ波 | ^{87}Rb | ground state | 6 834 682 610.904 312 Hz | 1.3×10^{-15} |
| 光 | ^{87}Sr | $5s^2 \ ^1S_0 - 5s5p \ ^3P_0$ | 429 228 004 229 873.4 Hz | 1.0×10^{-15} |
| 光 | $^{88}\text{Sr}^+$ | $5s \ ^2S_{1/2} - 4d \ ^2D_{5/2}$ | 444 779 044 095 485.3 Hz | 4.0×10^{-15} |
| 光 | ^{171}Yb | $6s^2 \ ^1S_0 - 6s6p \ ^3P_0$ | 518 295 836 590 865.0 Hz | 2.7×10^{-15} |
| 光 | $^{171}\text{Yb}^+$ | $6s \ ^2S_{1/2} - 4f^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}$ | 642 121 496 772 645.6 Hz | 1.3×10^{-15} |
| 光 | $^{171}\text{Yb}^+$ | $6s \ ^2S_{1/2} - 5d \ ^2D_{3/2}$ | 688 358 979 309 307.1 Hz | 3×10^{-15} |
| 光 | $^{199}\text{Hg}^+$ | $5d^{10}6s \ ^2S_{1/2} - 5d^96s^2 \ ^2D_{5/2}$ | 1 064 721 609 899 145.30 Hz | 1.9×10^{-15} |
| 光 | $^{27}\text{Al}^+$ | $3s^2 \ ^1S_0 - 3s3p \ ^3P_0$ | 1 121 015 393 207 857.3 Hz | 1.9×10^{-15} |

^a2013 年に勧告されたリスト。

間（稼働率 84 %）の運転が報告された³⁸⁾。

5.2 測地学への応用

測地学は、地球の形や大きさ、重力、およびそれらの時間変化を測定し、地震、火山、水の動きといった地球の活動に関する知見を得る学門である。ここでは、光格子時計による重力測定という新しい測定手法について述べる。

アインシュタインの一般相対性理論によると、重力ポテンシャルが大きくなるにつれて時間の進みが遅くなる。この性質を利用して、光格子時計を重力ポテンシャル差を精密に測定するツールとして用いることができる。異なる重力ポテンシャル U_1 と U_2 の中に置かれた 2 つの時計の相対周波数差は以下のように書ける。

$$\Delta f/f = -\Delta U/c^2, \quad (10)$$

ここで、 c は光速、 $\Delta U = U_1 - U_2$ は 2 つの時計の位置における重力ポテンシャルの差、 $\Delta f = f_1 - f_2$ はそれらの時計の周波数差である。2 つの時計で $\Delta f/f \sim 10^{-18}$ の周波数差を検出するとき、重力ポテンシャルの差は $\Delta U = c^2 10^{-18} \sim 0.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ である。これは、地球上の重力加速度が約 9.8 m/s^2 であるので、2 つの時計の高さの差 $\sim 1 \text{ cm}$ に相当する。

重力ポテンシャルの差は、水の流れる方向を決めるため、海岸防災、水資源管理などに重要な情報を与える。平均海面に最も近い等重力ポテンシャル面はジオイドと呼ばれており、ジオイドを基準として標高が定義されている。現在、重力ポテンシャルを直接測定する装置はなく、測量による高さ測定と重力加速度測定から重力ポテンシャルを求めている。例えば、ドイツでは、 $3.0 \times 10^4 \text{ km}$ 以上の距離の測量を 1 ステップ約 50 m で行う。この方法は、非常に手間と費用がかかるだけでなく、1 ステップの測量の誤差が蓄積されて全体に影響を与えるため、測定精度は数 cm 程度である。また、各国、地域間で高さの不整合が生じている。現在用いられているもう 1 つのアプローチとして、全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System: GNSS) と重力場モデルを利用する方法がある。この方法は、測量を用いる方法よりも測定領域を広げることができ、地域間の不整合が起らない。しかし、GNSS と測量の測定値に不一致があることが分かっている³⁹⁾。一方で、光格子時計を用いた方法でこれらの問題を解決できる可能性がある。光格子時計を様々な場所に設置し、光ファイバーまたは衛星を用いて互いに周波数差 Δf を測定することで、重力ポテンシャルの差が分かる (式 (10) を参照)。時計

の周波数は、原子の遷移周波数という信頼性の高い物理量で決まっており、地域間の不整合が起らないことが期待される。また、時計の配置次第で、広範囲かつ高空間分解能で測定することが可能である。さらに、光格子時計で重力ポテンシャルが直接求まると、重力加速度測定と組み合わせることで、地下の物体 (マグマや地下資源等) の位置と大きさを推定することができる⁴⁰⁾。

地震、火山活動などが起こると地盤が変位する。図 2 に示すように、変位の時間スケールは、地殻変動現象の種類に応じて異なる⁴¹⁾。図 2 には、例として地震時 (coseismic)、地震後 (post-seismic) の変位、岩脈貫入 (dyke intrusion)、マグマ溜まり (magma chamber) を示している。上述のように、地盤が変位して時計の高さが変わると、周波数差 Δf の変化として観測される。図 2 の黒線は JILA の不確かさ 10^{-18} 台の光格子時計の周波数安定度¹²⁾ から計算した地殻変動現象の検出感度曲線であり、黒線より右上の現象が観測可能であることを示している。光格子時計の短期安定度の良さが、様々な現象の観測を可能にすることが分かる。

秒の定義改訂に向けて、各国の光時計を遠隔地で比較する必要が生じると考えられる。しかし、高精度な時計が重力ポテンシャル (または高さ) のわずかな差に感度がある事実は、時計の遠隔比較を困難にする。というのも、高さ測定の不確かさが、時計の周波数の不確かさに影響を与え得るからである。そのため、比較する 2 つの時計の高さの違いを精密に評価しなくてはならないが、海を越えた大陸間の比較など、困難な場合がある。最も信頼性の高い比較方法は、2 台の時計を同じ光学テーブルの上に持ち寄って比較する方法である。また、測地学

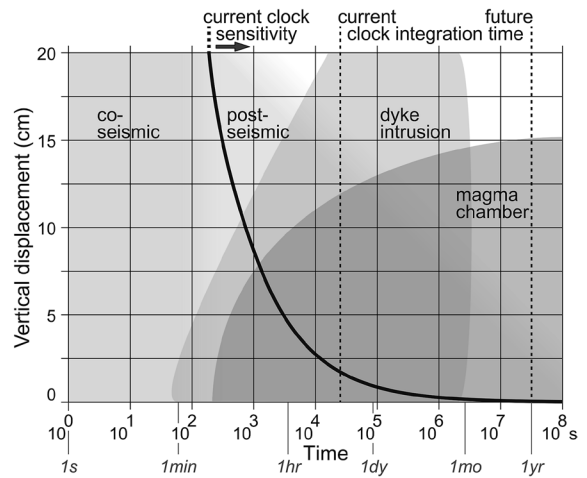


図 2 地殻変動現象の種類に応じた時間スケールと鉛直方向変位。この図は文献⁴¹⁾から抜粋。

への応用には、時計を運ぶことが不可欠であるし、以下で述べる基礎物理学の検証実験の中には、時計を宇宙に飛ばす提案もされている。こういった背景から、小型で可搬な時計の必要性が認識されており、ヨーロッパの研究機関で積極的に可搬型光格子時計の開発が進められている⁴²⁾⁻⁴⁴⁾。理研では、Sr原子を中空ファイバー中の光格子に捕獲する研究も行っており⁴⁵⁾、大幅に時計を小型化する方法の1つとして期待されている。

5.3 基礎物理学の検証

2012年に欧州原子核研究機構(CERN)でヒッグス粒子が発見され⁴⁶⁾、素粒子物理学の「標準理論」の重要な要素が実証された。これを受け、加速器実験をはじめとする基礎物理学の検証を目的とした研究分野では、「標準理論を超えた」物理現象の探索へ関心が向けられている。標準理論は、存在が確認された素粒子の性質や反応過程を予言し、実験結果とよく一致することが分かっている。しかし、標準理論では扱うことができない重要な問題が残っている。代表的なものは例として、i) 4つの力(電磁気力、弱い力、強い力、重力)の統一、ii) 宇宙の96%を占めるダークマター、ダークエネルギーの性質の解明が挙げられる。これらの問題に対する実験的アプローチは、加速器実験や天文観測といった巨大な装置を使う方法が主流であるが、近年、テーブルトップ実験の1つとして、原子時計を用いた方法も注目されている。

プランク定数 h 、素電荷 e 、微細構造定数 α など、物理法則に普遍的に現れ、時間とともに変化しないとされている量を基礎物理定数と呼ぶ。原子の遷移周波数は、基礎物理定数に依存する。基礎物理定数が一定不変であることが、原子時計を時間・周波数標準として利用できる所以である。一方で、4つの力の統一を試みる理論では、例えば3次元空間と時間の他に余剰次元が存在し、基礎物理定数が余剰次元の影響で変動することが予言されている⁴⁷⁾。もし基礎物理定数がわずかにでも変化すると、原子時計の周波数の変化として観測される可能性がある。

原子の遷移周波数は、微細構造定数 α 、陽子電子質量比 $\mu = m_p/m_e$ などの定数に依存する。例えば、Cs原子時計で測定したSr光格子時計の周波数の変化 $\delta(f_{Sr}/f_{Cs})$ は、基礎物理定数の変化 $\delta\alpha$ と $\delta\mu$ に対して、次のような関係がある。

$$\frac{\delta(f_{Sr}/f_{Cs})}{f_{Sr}/f_{Cs}} = (K_{Sr} - K_{Cs} - 2) \frac{\delta\alpha}{\alpha} + \frac{\delta\mu}{\mu} \quad (11)$$

ここで、感度係数 K_i は様々な原子種 i に対して計算さ

れている⁴⁸⁾。 α の変化に対するCs時計の感度は $K_{Cs} = 0.83$ で、Sr光格子時計は $K_{Sr} = 0.06$ である。また、Hg原子やYb原子を使った光時計の場合は、 $K_{Hg} = 1.16$ 、 $K_{Yb} = 0.45$ である。イオン時計には感度が高いものがあり、例えば $K_{Yb^+} = -5.298$ である⁴⁹⁾。これまでにさまざまな原子種の時計の周波数比較が行われ^{28), 50)-54)}、基礎物理定数の時間変化に制限がつけられてきた。図3はそれらの結果を合わせたものである。これから

$$\frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = -0.20(20) \times 10^{-16}/\text{yr}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} = -0.5(1.6) \times 10^{-16}/\text{yr}, \quad (13)$$

が得られている⁵⁴⁾。()内の数値は標準不確かさを表す。現在も不確かさを小さくする試みが続けられており、今後の進展が期待される。

4つの力の統一を試みる理論の中には、重力の理論である一般相対性理論の破れを示唆したものがあり、原子時計による検証が行われてきた。第5.2節で述べたように、重力ポテンシャルの違いで時計の周波数はシフトするが(式(10)参照)、周波数シフト量を精密に測定することで、相対性理論による計算値との不一致を検出できるかもしれない。宇宙船に搭載した原子時計と地上の原子時計を比較すると、大きな重力ポテンシャル差を作ることができ、感度を上げることができる。このような実験を光時計で行うプロジェクトとして、SAGAS (Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors) プロジェクト⁵⁵⁾やEGE (Einstein Gravity Explorer mission) プロジェクト⁵⁶⁾が提案されている。SAGAS プロジェクトは、水素メーザーを用いた現時点で最も精密な検証実験⁵⁷⁾ (70×10^{-6} レベルで相対性理論と一致することを確認)よりも4桁の精度向上が期待されている。

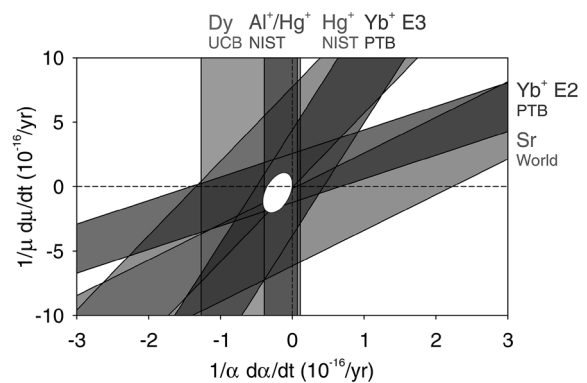


図3 さまざまな原子時計の周波数比較^{28), 50)-54)}から得られた α と μ の時間変化の制限。この図は文献54)から抜粋。

地球上では、光時計を用いた一般相対性理論の検証実験が既に行われている。地球上の時計は、太陽の周りを楕円軌道で公転しており、1年周期で変化する重力ポテンシャルを感じている。ここでは、一般相対性理論の破れが、基礎物理定数と重力ポテンシャルとの結合によって生じると仮定した解析が行われている。 α と μ の重力ポテンシャルへの結合係数を k_α と k_μ と仮定すると、Cs原子時計で測定したSr光格子時計の周波数は次のように時間変化するかもしれない。

$$\frac{\delta(f_{\text{Sr}}/f_{\text{Cs}})}{f_{\text{Sr}}/f_{\text{Cs}}} = -[(K_{\text{Sr}} - K_{\text{Cs}} - 2)k_\alpha - k_\mu] \times \frac{Gm_{\text{Sun}}}{ac^2} \epsilon \cos(\Omega t). \quad (14)$$

ここで、 G は重力定数、 m_{Sun} は太陽質量、 a は軌道長半径、 c は光速、 $\epsilon \sim 0.0167$ は軌道楕円率、 $\Omega \sim \sqrt{Gm_{\text{Sun}}/a^3}$ は地球の角速度である。地球の角速度はよく分かっているので、式(14)の余弦関数 $\cos(\Omega t)$ の振幅をフリーパラメータとして、Sr周波数測定値にフィットできる。最近のデータ解析では、式(14)の振幅は $1.2(4.4) \times 10^{-16}$ と求まっており、有意な1年周期の変化は観測されていない²⁸⁾。 k_α と k_μ を得るには、少なくとももう1つの原子種のデータが必要であるが、Srと Hg^{+52} と水素メーザー⁵⁸⁾のデータを組み合わせた解析で、 k_α と k_μ に制限がつけられている⁵⁹⁾。

天文観測からダークマターが存在することは確実とされているが、ダークマターに相当する素粒子が標準理論には現れず、探索実験が精力的に行われている⁶⁰⁾。最近、原子時計を用いた検出の可能性の提案がされた⁶¹⁾。ダークマターと標準理論の粒子(例えば電子)との相互作用に関する理論研究はいくつかあり⁶²⁾、ダークマターの存在で標準理論の粒子の質量と相互作用結合定数が変化することが示唆されている。原子時計を通過するダークマターが存在すると、原子を構成する粒子の質量や微細構造定数 α が変化し、原子時計の周波数変化として検出できるかもしれない。文献⁶¹⁾では、コンプトン波長 $d \sim \hbar/(m_\phi c)$ が地球程度の大きさになる質量 $m_\phi \sim 10^{-14}$ eVの非常に軽いダークマターに着目している。そのダークマターに相当する粒子の場を ϕ とすると、 α は次のように変化すると仮定している。

$$\frac{\delta\alpha}{\alpha} = \frac{\phi^2}{\Lambda_\alpha^2}, \quad (15)$$

ここで、 Λ_α はダークマターと標準理論の粒子との結合が起こるエネルギースケールを表す(例えば、標準理論の範囲内において、エネルギースケール 10^2 GeVで電磁気力と弱い力が統一されることが知られているが、それと

類似した現象が起こると仮定している)。これまでの探索実験や天文観測⁶³⁾では、 $\Lambda_\alpha < 10$ TeVでそのような結合が起こらないことが確かめられている。人工衛星や光ファイバーで、不確かさ 10^{-18} 台の時計を大陸を超えてリンクさせることができれば、 $\Lambda_\alpha = 10^8 \sim 10^{11}$ TeV程度までの検証が可能であると期待されている⁶¹⁾。

6. まとめと今後の展望

光格子時計は、最近 10^{-18} 台の不確かさが実証されるようになり、次世代の秒の定義の有力な候補になっている。これから複数の研究機関で、 10^{-18} 台の時計を開発することが重要になる。さらに 10^{-19} 台の不確かさを追求する研究が始まっている。また、時計の小型化・可搬化と長期運用技術の確立が時計のさまざまな応用に必要になってくる。時計の研究課題はまだたくさん残っているといえるだろう。このような高度な研究課題の解決には、各国の研究機関との間の競争・協力が不可欠になるだろう。将来、よりよい時計が開発され、科学技術の進歩に貢献することが期待される。

産総研では、これまでYb光格子時計²⁹⁾とSr光格子時計³¹⁾の2台の時計を開発し、絶対周波数を測定した。また、2台の時計の周波数比³⁵⁾を測定した。これらの測定で得られた値は、秒の二次表現の周波数の決定に寄与した。今後は、秒の定義改定後に、光格子時計を標準器として社会実装することを重要課題とする。現在、光周波数による時系の構築を視野に入れた長期運用可能な光格子時計を開発している。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、ご指導・ご助言をいただきました保坂一元時間標準研究グループ長、安田正美主任研究員、ならびに時間標準研究グループ、周波数計測研究グループの皆様へ感謝いたします。

参考文献

- 1) J. M. Kellogg, I. I. Rabi, N. F. Ramsey, and J. R. Zacharias, "The magnetic moments of the proton and the deuteron. the radiofrequency spectrum of H2 in various magnetic fields," *Phys. Rev.* **56**, 728-724 (1939).
- 2) W. Markowitz, R. G. Hall, L. Essen, and J. V. L. Parry, "Frequency of cesium in terms of ephemeris time," *Phys. Rev. Lett.* **1**, 105-107 (1958).

- 3) A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati, and W. D. Phillips, "Ramsey resonance in a Zacharias fountain," *Europhys. Lett.* **16**, 165 (1991).
- 4) J. Vanier and C. Audoin, "The classical caesium beam frequency standard: fifty years later", *Metrologia* **42**, S31 (2005).
- 5) Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Absolute optical frequency measurement of the cesium D₁ line with a mode-locked laser," *Phys. Rev. Lett.* **82**, 3568-3571 (1999).
- 6) S. A. Diddams, D. J. Jones, J. Ye, S. T. Cundiff, J. L. Hall, J. K. Ranka, R. S. Windeler, R. Holzwarth, Th. Udem, and T. W. Hänsch, "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb," *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5102-5105 (2000).
- 7) R. H. Dicke, "The Effect of Collisions upon the Doppler Width of Spectral Lines," *Phys. Rev.* **89**, 472 (1953).
- 8) H. G. Dehmelt, "Motion oscillator as potential ultimate laser frequency standard," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, **31**, 83-87 (1982).
- 9) C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, "Frequency comparison of two high-accuracy Al⁺ optical clocks," *Phys. Rev. Lett.* **104**, 070802 (2010).
- 10) H. Katori, "Spectroscopy of strontium atoms in the Lamb-Dicke confinement," *Proc. of the 6th Symp. on Frequency Standards and Metrology*, 323 (2002).
- 11) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, "An optical lattice clock," *Nature* **435**, 321 (2005).
- 12) B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, S. L. Campbell, M. Bishof, X. Zhang, W. Zhang, S. L. Bromley, and J. Ye, "An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10⁻¹⁸ level," *Nature* **506**, 71-75 (2014).
- 13) I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, "Cryogenic optical lattice clocks," *Nat. Photonics* **6**, 185-189 (2015).
- 14) T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, B. J. Bloom, R. L. McNally, W. Zhang, M. D. Barrett, M. S. Safronova, G. F. Strouse, W. L. Tew, and J. Ye, "Systematic evaluation of an atomic clock at 2 × 10⁻¹⁸ total uncertainty," *Nat. Commun.* **6**, 6896 (2015).
- 15) H. S. Margolis *et al.*, *Contemporary Physics* **51**, 37 (2010).
- 16) 安田正美, "光格子時計を用いた光周波数標準" 産総研計量標準報告 **Vol. 4, No. 3**, 137 (2006).
- 17) 保坂一元, "光格子時計のための線幅 1 Hz 級レーザーの開発" 産総研計量標準報告 **Vol. 7, No. 1**, 11 (2008).
- 18) 赤松大輔, "光格子時計の応用に関する調査研究" 産総研計量標準報告 **Vol. 8 No. 2**, 201 (2011).
- 19) H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, "Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift trap", *Phys. Rev. Lett.* **91**, 173005 (2003).
- 20) P. G. Westergaard, J. Lodewyck, L. Lorini, A. Lecallier, E. A. Burt, M. Zawada, J. Millo, and P. Lemonde, "Lattice-induced frequency shifts in Sr optical lattice clocks at the 10⁻¹⁷ level," *Phys. Rev. Lett.* **106**, 210801 (2011).
- 21) T. L. Nicholson, M. J. Martin, J. R. Williams, B. J. Bloom, M. Bishof, M. D. Swallows, S. L. Campbell, and J. Ye, "Comparison of two independent Sr optical clocks with 1 × 10⁻¹⁷ stability at 10³s," *Phys. Rev. Lett.* **109**, 230801 (2012).
- 22) V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, and H. Katori, "Multipole, nonlinear, and anharmonic uncertainties of clocks of Sr atoms in an optical lattice," *Phys. Rev. A*, **88**, 013405 (2013).
- 23) T. Middelmann, S. Falke, C. Lisdat, and U. Sterr, "High Accuracy Correction of Blackbody Radiation Shift in an Optical Lattice Clock," *Phys. Rev. Lett.* **109**, 263004 (2012).
- 24) K. Beloy, N. Hinkley, N. B. Phillips, J. A. Sherman, M. Schioppa, J. Lehman, A. Feldman, L. M. Hanssen, C. W. Oates, and A. D. Ludlow, "Atomic Clock with 1 × 10⁻¹⁸ Room-Temperature Blackbody Stark Uncertainty," *Phys. Rev. Lett.* **113**, 260801 (2014).
- 25) H. Katori, V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, and V. G. Palchikov, "Strategies for reducing the light shift in atomic clocks," *Phys. Rev. A* **91**, 052503 (2015).
- 26) P. Gill, "When should we change the definition of the second?," *Phil. Trans. R. Soc. A* **369**, 4109 (2011).
- 27) S. Falke, N. Lemke, C. Grebing, B. Lipphardt, S. Weyers, V. Gerginov, N. Huntemann, C. Hagemann, A. Al-Masoudi, S. Häfner, S. Vogt, U. Sterr, C. Lisdat, "A strontium lattice clock with 3 × 10⁻¹⁷ inaccuracy and its frequency," *New J. Phys.* **16**, 073023 (2014).
- 28) R. Le Targat, L. Lorini, Y. Le Coq, M. Zawada, J. Guna, M. Abgrall, M. Gurov, P. Rosenbusch, D.G. Rovera, B. Nagrny, R. Gartman, P. G. Westergaard, M. E.

- Tobar, M. Lours, G. Santarelli, A. Clairon, S. Bize, P. Laurent, P. Lemonde, and J. Lodewyck, "Experimental realization of an optical second with strontium lattice clocks," *Nat. Commun.* **4**, 2109 (2013).
- 29) M. Yasuda, H. Inaba, T. Kohno, T. Tanabe, Y. Nakajima, K. Hosaka, D. Akamatsu, A. Onae, T. Suzuyama, M. Amemiya, and F.-L. Hong, "Improved Absolute Frequency Measurement of the ^{171}Yb Optical Lattice Clock towards a Candidate for the Redefinition of the Second," *Appl. Phys. Express* **5**, 102401 (2012).
- 30) C. Y. Park, D.-H. Yu, W.-K. Lee, S. E. Park, E. B. Kim, S. K. Lee, J. W. Cho, T. H. Yoon, J. Mun, S. J. Park, T. Y. Kwon, and S.-B. Lee, "Absolute frequency measurement of $^1\text{S}_0 (F=1/2) - ^3\text{P}_0 (F=1/2)$ transition of ^{171}Yb atoms in a one-dimensional optical lattice at KRISS," *Metrologia* **50**, 119–128 (2013).
- 31) D. Akamatsu, H. Inaba, K. Hosaka, M. Yasuda, A. Onae, T. Suzuyama, M. Amemiya, and F.-L. Hong, "Spectroscopy and frequency measurement of the ^{87}Sr clock transition by laser linewidth transfer using an optical frequency comb," *Appl. Phys. Express* **7**, 012401 (2014).
- 32) D.-H. Yu, M. Weiss, and T. E. Parker, "Uncertainty of a frequency comparison with distributed seed time and measurement interval offset," *Metrologia* **44**, 91–96 (2007).
- 33) H. Hachisu and T. Ido, "Intermittent optical frequency measurements to reduce the dead time uncertainty of frequency link," *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 112401 (2015).
- 34) T. Tanabe, D. Akamatsu, T. Kobayashi, A. Takamizawa, S. Yanagimachi, T. Ikegami, T. Suzuyama, H. Inaba, S. Okubo, M. Yasuda, F.-L. Hong, A. Onae, and K. Hosaka, "Improved Frequency Measurement of the $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ Clock Transition in ^{87}Sr Using a Cs Fountain Clock as a Transfer Oscillator," *J. Phys. Soc. Jpn.* **84**, 115002 (2015).
- 35) D. Akamatsu, M. Yasuda, H. Inaba, K. Hosaka, T. Tanabe, A. Onae, and F.-L. Hong, "Frequency ratio measurement of ^{171}Yb and ^{87}Sr optical lattice clocks," *Opt. Express* **22**, 7898–7905 (2014).
- 36) K. Yamanaka, N. Ohmae, I. Ushijima, M. Takamoto, and H. Katori, "Frequency Ratio of ^{199}Hg and ^{87}Sr Optical Lattice Clocks beyond the SI Limit," *Phys. Rev. Lett.* **114**, 230801 (2015).
- 37) N. Nemitz, T. Ohkubo, M. Takamoto, I. Ushijima, M. Das, N. Ohmae, and H. Katori, "Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 s averaging time," *Nat. Photonics* doi: 10.1038/nphoton.2016.20 (2016).
- 38) I. R. Hill, R. Hobson, W. Bowden, E. M. Bridge, S. Donnellan, E. A. Curtis, and P. Gill, "A low maintenance Sr optical lattice clock," arXiv:1311.0029 (2013).
- 39) T. Gruber, C. Gerlach, and R. Haegmans, "Intercontinental height datum connection with GOCE and GPS-levelling data," *Journal of Geodetic Science* **2**, 270 (2012).
- 40) R. Bondaescu, M. Bondaescu, G. Hetényi, L. Boschi, P. Jetzer, and J. Balakrishna, "Geophysical applicability of atomic clocks: direct continental geoid mapping," *J. Int.* **191**, 78–82 (2012).
- 41) R. Bondaescu, A. Schärer, A. Lundgren, G. Hetényi, N. Houlié, P. Jetzer, and M. Bondaescu, "Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion," *Geophys. J. Int.* **202**, 1770–1774 (2015).
- 42) G. Mura, T. Franzen, C. A. Jaoudeh, A. Görlitz, H. Luckmann, I. Ernsting, A. Nevsky, S. Schiller, and the SOC2 Team, "A transportable optical lattice clock using ^{171}Yb ," in *Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium*, EFTF/IFC 376–378 (2013).
- 43) N. Poli, M. Schioppo, S. Vogt, S. Falke, U. Sterr, C. Lisdat, G. M. Tino, "A transportable strontium optical lattice clock," *Appl. Phys. B* **117**, 1107–1116 (2014).
- 44) K. Bongs, Y. Singh, L. Smith, W. He, O. Kock, D. Świerad, J. Hughes, S. Schiller, S. Alighanbari, S. Origlia, S. Vogt, U. Sterr, C. Lisdat, R. Le Targat, J. Lodewyck, D. Holleville, B. Venon, S. Bize, G. P. Barwood, P. Gill, I. R. Hill, Y. B. Ovchinnikov, N. Poli, G. M. Tino, J. Stuhler, and W. Kaenders, "Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS," *C. R. Physique* **16**, 553–564 (2015).
- 45) S. Okaba, T. Takano, F. Benabid, T. Bradley, L. Vincetti, Z. Maizelis, V. Yampol'skii, F. Nori, and H. Katori, "Lamb-Dicke spectroscopy of atoms in a hollow-core photonic crystal fibre," *Nat. Comm.*, **5**, 4096 (2014).
- 46) G. Aad *et al.*, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC," *Phys. Lett. B* **716**, 1–29 (2012).
- 47) J. -P. Uzan, "The fundamental constants and their

- variation: observational and theoretical status,” *Rev. Mod. Phys.* **75**, 403–455 (2003).
- 48) V. V. Flambaum and V. A. Dzuba, “Search for variation of the fundamental constants in atomic, molecular, and nuclear spectra,” *Can. J. Phys.* **87**, 25–33 (2009).
- 49) V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, and M. V. Marchenko, “Relativistic effects in Sr Dy, Yb II, and Yb III and search for variation of the fine-structure constant”, *Phys. Rev. A* **68**, 022506 (2003).
- 50) T. Rosenband, D. Hume, P. Schmidt, C. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. Oskay, R. Drullinger, T. Fortier, J. Stalnaker, S. Diddams, W. Swann, N. Newbury, W. Itano, D. Wineland, and J. Bergquist, “Frequency ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place,” *Science* **28**, 1808–1812 (2008).
- 51) Chr. Tamm, N. Huntemann, B. Lipphardt, V. Gerginov, N. Nemitz, M. Kazda, S. Weyers, and E. Peik, “Cs-based optical frequency measurement using cross-linked optical and microwave oscillators,” *Phys. Rev. A* **89**, 023820 (2014).
- 52) T. M. Fortier, N. Ashby, J. C. Bergquist, M. J. Delaney, S. A. Diddams, T.P. Heavner, L. Hollberg, W.M. Itano, S.R. Jefferts, K. Kim, F. Levi, L. Lorini, W. H. Oskay, T. E. Parker, J. Shirley, and J. E. Stalnaker, “Precision atomic spectroscopy for improved limits on variation of the fine structure constant and local position invariance,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 070801 (2007).
- 53) N. Leefer, C. T. M. Weber, A. Cingöz, J. R. Torgerson, and D. Budker, “New limits on variation of the fine-structure constant using atomic dysprosium,” *Phys. Rev. Lett.* **111**, 060801 (2013).
- 54) N. Huntemann, B. Lipphardt, Chr. Tamm, V. Gerginov, S. Weyers, and E. Peik, “Improved limit on a temporal variation of m_p/m_e from comparisons of Yb^+ and Cs atomic clocks,” *Phys. Rev. Lett.* **113**, 210802 (2014).
- 55) P. Wolf *et al.*, “Quantum physics exploring gravity in the outer solar system: the SAGAS project,” *Exp. Astron.* **23**, 651–687 (2009).
- 56) S. Schiller *et al.*, “Einstein Gravity Explorer—a medium-class fundamental physics mission,” *Exp. Astron.* **23**, 573–610 (2009).
- 57) R. F. C. Vessot, M. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, R. Decher, P. B. Eby, C. R. Baugher, J. W. Watts, D. L. Teuber, and F. D. Wills, “Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser,” *Phys. Rev. Lett.* **45**, 2081 (1980).
- 58) N. Ashby, T. P. Heavner, S. R. Jeffers, T. E. Parker, A. G. Radnaev, and Y. O. Dudin, “Testing local position invariance with four cesium-fountain primary frequency standards and four NIST hydrogen masers,” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 070802 (2007).
- 59) S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen, T. Zelevinsky, M. M. Boyd, J. Ye, X. Baillard, M. Fouché, R. Le Targat, A. Brusch, P. Lemonde, M. Takamoto, F.-L. Hong, H. Katori, V. V. Flambaum, “New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ^{87}Sr optical lattice clock,” *Phys. Rev. Lett.* **100**, 140801 (2008).
- 60) G. Bertone (ed.), “Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches,” (Cambridge Univ. Press. 2010).
- 61) A. Derevianko and M. Pospelov, “Hunting for topological dark matter with atomic clocks,” *Nat. Phys.* **10**, 933–936 (2014).
- 62) R. Essig *et al.*, “Dark sectors and new, light, weakly-coupled particles,” arXiv:1311.0029 (2013).
- 63) K. A. Olive, and M. Pospelov, “Environmental dependence of masses and coupling constants,” *Phys. Rev. D* **77**, 043524 (2008).