

香取量子計測研究室
Quantum Metrology Laboratory

主任研究員 香取 秀俊 (工博)
KATORI, Hidetoshi (D. Eng.)



キーセンテンス：

1. 光格子時計の高精度化に向けた高次の光シフト評価
2. 光格子時計の周波数比の高精度な測定
3. カドミウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現

キーワード：

量子エレクトロニクス、原子時計、レーザー冷却、極低温原子衝突、量子縮退原子気体、量子計測、量子情報、光格子時計、魔法波長

研究目的

原子スペクトル計測の極限的精度の追求は、量子力学の誕生や現代物理学の発展に大きく貢献してきた。この成果として実現される高精度原子時計は、GNSS (Global Navigation Satellite System) による測位や超高速大容量通信ネットワークのタイミング制御など、現代生活を支える基幹技術となっている。我々は2001年に新たな原子時計手法「光格子時計」の概念を提案した。これが実現すれば、原理的には1秒の計測時間で18桁の精度で時間計測が可能になる。このような人類未踏の領域での高精度周波数比較をツールとして、基礎物理定数の恒常性の検証、相対論的な時空の歪みを測地学へ応用する相対論的測地学など、最先端の時間計測に基づく基礎物理の探究とその工学的応用を目指す。これと並行して、「光格子時計」をプラットフォームとした、量子フィードバック手法の検討や量子シュミレータ・コンピュータの研究、また、固体原子デバイス (アトムチップ) の開発など、極低温原子を用いる量子情報技術、量子計測の研究を展開する。

1. 光格子時計の高精度化に向けた高次光シフトの評価 (高本、牛島、Bregolin、水嶋、香取)

Sr、Yb原子を用いた光格子時計の高精度化に向けて、光格子レーザーが引き起こす光シフトを高次の効果まで含めて厳密に評価した。これまで光格子時計は、電気双極子相互作用によって生じる光強度に対して線形な光シフトを相殺するように魔法波長を決定し、光格子レーザーによる光シフトの不確かさを評価してきた。しかし、18桁を超える時計精度では、多重極相互作用および超分極効果によって生じる高次の非線形効果も考慮する必要がある。これらの原子固有の効果を高精度に測定して、光シフトを実験的に決定することは、今後の光格子時計の高精度化において不可欠である。

高次の光シフトを評価するために、光格子レーザー強度を大きく変化させて、広い強度範囲で周波数シフトを測定する。Sr光格子時計では、光共振器を導入し、光強度を約40倍に増強し、Yb光格子時計では、既存の光学系を拡張して、より小さなビーム径で光格子を形成することによって、光格子レーザーの光強度をおよそ8倍に増強した。光格子レーザーの強度、周波数、振動量子数を変化させて、時計周波数の依存性を測定した。その結果、高次の効果による光シフトの非線形性が観測され、観測された光シフトから高次の効果に関するパラメータを実験的に導出した。現在、光シフトの不確かさを最小にするような最適な光格子レーザーの条件を検討している。

2. 光格子時計の周波数比の高精度な測定 (大前、Bregolin、松浦、水嶋、香取)

高精度な光格子時計の時計遷移周波数を、現行の周波数の定義に従って測定すると、その不確かさは現在の秒の定義であるセシウム原子時計の実現精度 (不確かさ 5×10^{-16} 程度) で制限される。光格子時計の精度の高さを証明するには、光格子時計同士の周波数を直接比較 (=周波数比を測定) することが必要となる。これまでに、ストロンチウム (Sr) 光格子時計に対する、水銀 (Hg) およびイッテルビウム (Yb) 光格子時計の時計周波数比 $f_{\text{Hg}}/f_{\text{Sr}}$ 、 $f_{\text{Yb}}/f_{\text{Sr}}$ を、現在のSI秒の実現精度を超える17桁精度で報告してきた。

このときの周波数比測定の安定度が、光周波数コム周波数伝送安定度 (平均化時間1秒で約 3×10^{-16}) で制限されていたため、より高安定 (=短時間の測定で高精度) かつ堅牢性の高い周波数比計測に向けた全偏波保持構成エルビウムファイバコムを開発した。高い信号対雑音比の光コムを単一ポート出力にすることで低位相雑音化を実現し、光格子時計同士の周波数を平均化時間1秒で 10^{-17} よりも小さな不確かさでつなぐことができることを示した。

この光周波数コムを用いて、水銀とイッテルビウム光格子時計の周波数比 $f_{\text{Hg}}/f_{\text{Yb}}$ の測定を行った。周波数比の安定度は $2 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ となり、光周波数コムで制限されていた安定度の改善が見られた。また、3つの時計の周波数比を掛け合わせると $(f_{\text{Yb}}/f_{\text{Sr}}) \times (f_{\text{Sr}}/f_{\text{Hg}}) \times (f_{\text{Hg}}/f_{\text{Yb}}) = 1$ と循環するはずである。今回測定した周波数比 $f_{\text{Hg}}/f_{\text{Yb}}$ と、昨年度までの測定で得られた周波数比から計算される $(f_{\text{Hg}}/f_{\text{Sr}}) \times (f_{\text{Sr}}/f_{\text{Yb}})$ の差は周波数比で規格化すると 8×10^{-17} であった。各比の測定の合成不確かさ 1×10^{-16} より小さく、SI秒を超える精度での周波数比の循環性を確認した。今後は、より小さな不確かさでの周波数比の測定を目指す。もし物理定数が一定でない（変動する）ことがあれば周波数比の変動として検出できるため、物理定数の恒常性の精密な検証を行っていく。

また、高精度な周波数比の測定は、将来の秒の再定義に向けた標準周波数の勧告値への寄与が大きい。Sr, Yb原子による光格子時計はすでに秒の二次表現に採択されていたが、2017年に新たにHg光格子時計の時計周波数が秒の二次表現に加わった。

3. カドミウム原子を用いた光格子時計の開発（山口、香取）

光格子時計の不確かさを制限する大きな要因の1つに黒体放射シフトがある。本研究室のSrやYb光格子時計では、黒体放射を抑える極低温環境を用意し、その中で時計遷移を観測している。黒体放射シフトを抑えるもう一つの方法は、黒体放射に対する感度の小さな原子を用いることである。その有力な候補の1つが、カドミウム (Cd) 原子である。Cd原子は、SrやYbに比べて黒体放射光への感度がおおよそ1桁小さい。そのため、黒体放射を抑制する特殊な低温環境を作らなくても、室温で高精度な光格子時計を実現できる可能性がある。そこで、本研究ではCd原子を用いた光格子時計の開発を進めている。

本研究では、昨年度までに、2段階レーザー冷却によりCd原子を温度5 μ Kまで冷却した。本年度は、こうして冷却したCd原子を光格子ポテンシャルに導入し、魔法波長を実験的に決定する実験を進めた。まず、光共振器を使い光格子用レーザーの強度を増強し、Cd原子に対して十分な深さの光格子ポテンシャルを用意した。そして、この光格子にCd原子を捕獲し、時計遷移を観測した。現在、光格子用レーザーによって引き起こされる時計遷移の周波数シフトの大きさを評価し、そのシフトが最も小さくなる魔法波長を決定する実験を進めている。

Key Sentence:

1. Evaluation of higher-order lattice light shifts in Sr and Yb optical lattice clocks towards uncertainties below 10^{-18}
2. Frequency ratio measurement of optical lattice clocks with the uncertainty beyond the SI second
3. Development of optical lattice clocks with cadmium atoms

Key Word:

Quantum electronics, atomic clock, laser cooling, ultracold collisions, quantum degenerate atomic gases, quantum metrology, quantum information, optical lattice clock, magic wavelength, relativistic geodesy

Purpose of Research:

The quest for superb precision in atomic spectroscopy contributed to the birth of quantum mechanics and the progress of modern physics. Highly precise atomic clocks, which are one of the outcomes of such research, are a key technology that supports our modern society, such as navigation with GNSS (Global Navigation Satellite System) and synchronization of high-speed communication networks. In 2001, we proposed a new atomic clock scheme, the “optical lattice clock,” which should allow us to access the 18-digit-precision in time/frequency in a measurement time of seconds. Armed with such high-precision atomic clocks, we investigate fundamental physics such as the constancy of fundamental constants and their coupling to gravity, as well as the application of such clocks to relativistic geodesy. In parallel, we explore quantum information technology and quantum metrology using “optical lattice clocks” as platforms to investigate the quantum feedback scheme and quantum simulator/computation.

1. Evaluation of higher-order lattice light shifts in Sr and Yb optical lattice clocks towards uncertainties below 10^{-18} (Takamoto, Ushijima, Bregolin, Mizushima, Katori)

Optical lattice clocks have been operated by tuning the lattice laser to the “magic frequency”, where the light shifts due to the electric-dipole polarizability are cancelled out as a linear shift in the lattice laser intensity. However, if we consider the higher order light shifts induced by the magnetic-dipole and electric-quadrupole polarizabilities and hyperpolarizabilities, the lattice light shift cannot be completely cancelled out by tuning the lattice laser frequency and dominates the clock's uncertainty at 10^{-18} . We have experimentally investigated the higher-order lattice light shifts and determined the lattice parameters to minimize the uncertainty of lattice light shifts for Sr and Yb.

To investigate the higher order light shifts, we have measured the parameter dependence of light shift in a wide range of lattice laser intensity. The intensity of the lattice is increased by employing a build-up cavity with an enhancement factor of 40 for the Sr clock and tight focusing optics to realize 8 times higher power density for the Yb clock. The light shift induced by the multipolar polarizabilities was extracted from the vibrational state dependence of light shifts. From a fit of the data to the light shift, we have derived the parameters for the higher order light shifts and determined the operational conditions to minimize the uncertainty of lattice light shifts.

2. Frequency ratio measurement of optical lattice clocks with the uncertainty beyond the SI second (Ohmae, Bregolin, Matsuura, Mizushima, Katori)

The absolute frequencies of optical lattice clocks can be measured with uncertainties limited by the realization of the frequency standard, $\sim 5 \times 10^{-16}$. Frequency ratio of optical lattice clocks is measurable beyond the SI limit. So far, we reported the frequency ratios of Hg/Sr, Yb/Sr with uncertainties of $\sim 10^{-17}$. Since the stabilities of these ratios are limited by the frequency transfer instability caused by the optical frequency comb, we have developed single-port, all-polarization-maintaining erbium fiber combs with a frequency transfer instability of less than 10^{-17} at an averaging time of 1 s.

Using this comb, we measured the frequency ratio of Hg and Yb clocks with an instability of $2 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau/s}$, where τ is an averaging time. We tested the cyclicity of the frequency ratios $(f_{Yb}/f_{Sr}) \times (f_{Sr}/f_{Hg}) \times (f_{Hg}/f_{Yb}) = 1$. The difference of the f_{Hg}/f_{Yb} measurement and the calculated value of $(f_{Hg}/f_{Sr}) \times (f_{Sr}/f_{Yb})$ based on the previous measurements was only 8×10^{-17} , which is smaller than the combined uncertainty of each frequency ratio measurement of 1×10^{-16} and SI limit of 5×10^{-16} . Such a highly-accurate frequency ratio can be a probe to test the constancy of the constants.

Highly-accurate frequency and frequency ratio measurement contributes to a standard frequency list made in CIPM. The frequencies of Sr and Yb clock frequencies are already in a list of secondary representations of the second (SRS), and Hg clock frequency is newly adopted as a SRS in 2017.

3. Development of optical lattice clocks with cadmium atoms (Yamaguchi, Katori)

One of the major uncertainties of an optical lattice clock is the black body radiation (BBR) shift. In order to suppress BBR shift, Sr and Yb optical lattice clocks in our group prepared atoms in a cold environment, which greatly suppresses emission of BBR. Another approach to reduce the uncertainty of BBR shift is to use atomic species that are insensitive to the BBR. As cadmium (Cd) has an order of magnitude smaller sensitivity to the BBR than Sr and Yb atoms, we have started the development of an optical lattice clock with Cd atoms, which should enable high accuracy and stability even in a room-temperature environment.

Until last year, we have developed a laser cooling technique to cool the Cd atoms down to 5 μ K. This year, we have loaded those ultracold Cd atoms into an optical lattice potential. We have constructed an optical cavity to enhance the optical lattice laser and to achieve trap depth which is deep enough to trap Cd atoms. We then observed the clock transition in Cd atoms trapped in the optical lattice potential. The magic wavelength of Cd, at which the frequency shift induced by the optical lattice laser becomes minimum, is being evaluated now.

Principal Investigator

香取 秀俊 Hidetoshi Katori

Research Staff

高本 将男 Masao Takamoto
山口 敦史 Atsushi Yamaguchi
大前 宣昭 Noriaki Ohmae

Students

高橋 忠宏 Tadahiro Takahashi
松浦 正俊 Masatoshi Matsuura
水嶋 玲 Ray Mizushima
王 昊宇 Haoyu Wang
坂間 俊亮 Shunsuke Sakama
西川 遣治 Kenji Nishikawa
三島 大明 Hiroaki Mishima

Assistant and Part-timer

小林 恵 Megumi Kobayashi

Visiting Members

牛島 一朗 Ichiro Ushijima
フィリッポ ブレゴリン Filippo Bregolin