

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. 低温動作ストロンチウム光格子時計による超高精度光格子時計の実現
2. イッテルビウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現
3. 水銀原子・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. 低温動作ストロンチウム光格子時計による超高精度光格子時計の実現 (高本、牛島、Das、香取)

本研究では、不確かさの主要因であった黒体輻射の影響を抑える低温動作型ストロンチウム (Sr) 光格子時計を開発し、2台の時計 (図1) を比較して18桁の精度で一致していることを確認した。現在、最も大きな不確かさの要因は、光格子レーザーに起因する高次の光シフトである。これは、今まで魔法波長を定義するために考慮されてきた光強度に比例する電気双極子相互作用よりも高次の、多重極効果および超分極効果によって生じる、光高度に対して非線形な光シフトのことである。この高次の光シフトを評価するため、2016年度は光共振器を導入し、光格子レーザー強度を今までの約40倍に増強した。その結果、光シフトの非線形性が観測された。今後、この効果を精密に評価し、19桁の精度をもった光格子時計の実現を目指す。

2. イッテルビウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現 (Nemitz、柳本、香取)

イッテルビウム (Yb) 原子は、原子の内部状態 (遷移周波数、遷移強度) および、飽和蒸気圧等のパラメータがストロンチウム原子と類似しているため、同一の真空装置、光学系を用いて光格子時計システムを構築することができる。本研究では、低温動作型Sr光格子時計システムを、Sr/Yb原子で共用する光格子時計として動作するように再構築し、Yb原子用のレーザー光源を新たに開発して、低温動作型Yb光格子時計を実現する。また、¹⁷¹Yb同位体は核スピンの1/2であり、核スピンの9/2であるSr原子よりもシンプルな準位構造を有し、より少ない光源で時計を構築できる利点がある。

前年度までに、Yb光格子時計の不確かさ評価を行い、17桁の精度が実現されていることを確認した。さらに、光周波数コムを用いてYb/Sr時計の周波数比較を行い、SI秒の定義の実現精度を一桁改善する17桁の不確かさで周波数比を測定することに成功した。2016年度は、光格子レーザーの強度を今までの8倍に増加させ、不確かさを制限している大きな要因である高次の非線形な光シフトの評価を行った。これにより、光格子レーザーによる光シフトの不確かさを18桁の精度で精密に評価した。

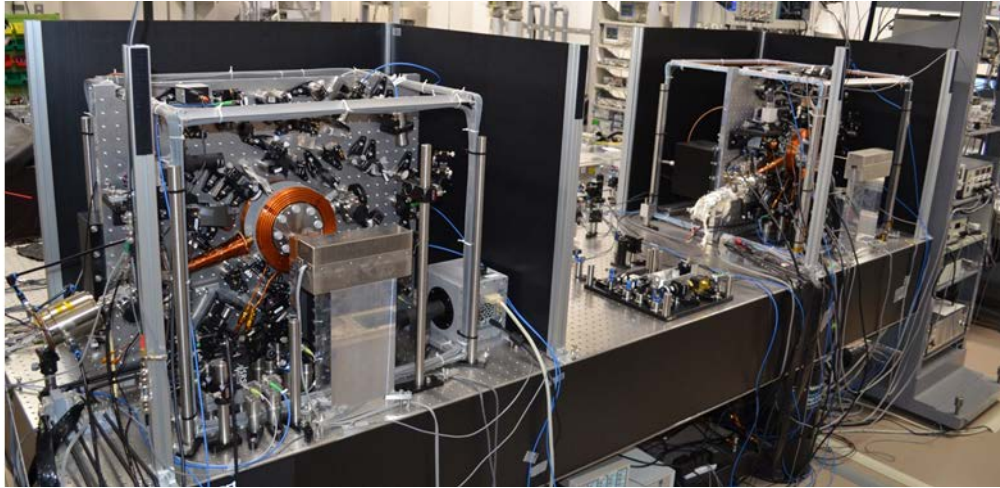


図1：開発した2台の低温動作型光格子時計。左側の装置は、Sr/Ybで共有した時計システム、右側はSr用の時計システムであり、Sr/Sr、Yb/Srの時計比較が切りかえられるようになっている。

3. 水銀原子・カドミウム原子を用いた超高精度光格子時計の実現（大前、松浦、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つに黒体輻射シフトがある。本研究室のSrやYb光格子時計では、黒体輻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。黒体輻射シフトを抑えるもう一つの方法は、黒体輻射に対する感度の小さな原子を用いることである。その有力な候補となる原子種が、水銀（Hg）原子とカドミウム（Cd）原子である。これらの原子は、Sr原子やYb原子に比べて黒体輻射に対する感度がおよそ1桁小さいため、低温環境を用意することなく、室温においても18桁精度が実現できる可能性がある。そこで本研究では、水銀原子とカドミウム原子を用いた光格子時計の開発を進めている。これらの原子種では、原子の状態操作に必要な遷移周波数が、主に紫外光領域にあるため、原子の冷却、トラップ、時計遷移分光には、安定な紫外光源の開発が不可欠である。我々は、半導体レーザーとその非線形波長変換、光周波数コムを利用した周波数合成等の様々な技術を駆使して高安定な紫外レーザー光源の開発を行った。

Hg光格子時計では、今までに16桁超の時計精度を実現している。2016年度はこの精度を制限している主な要因の1つである高次の光シフトを精密に測定するため、真空槽内にパワー増強用光共振器を作成した。Cd原子光格子時計では、今までにカドミウム原子の許容遷移、禁制遷移による磁気光学トラップに初めて成功している。2016年度は、 ^{113}Cd 同位体の時計遷移を観測することに成功し、現在、光格子への導入および魔法波長の測定に着手している。

Key Sentence:

1. Development of optical lattice clocks with strontium atoms in a cryogenic environment
2. Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms
3. Development of optical lattice clocks with mercury and 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. Development of optical lattice clocks with strontium atoms in a cryogenic environment (Takamoto, Ushijima, Das, Katori)

The fractional uncertainty of optical lattice clocks based on strontium (Sr) atoms in a cryogenic environment has reduced to 10^{-18} with suppressed blackbody-shift uncertainty. Frequencies of two such “cryogenic optical lattice clocks” agreed with the uncertainty of 10^{-18} . The largest uncertainty of the present Sr optical lattice clock is attributed to the nonlinear light shift induced by the multipolar and hyperpolarizability effect. In 2016, we have introduced an optical cavity to achieve 40 times higher lattice intensity, which enables precise evaluation of the high-order light shift. Careful evaluation of the nonlinear light shift is in progress to target a 19-digits clock accuracy.

2. Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms (Nemitz, Yanagimoto, Katori)

Ytterbium (Yb) atoms have similar properties to strontium atoms in transition wavelengths, dipole moments for cooling transition, and the saturated vapour pressure. It is therefore allowed to realize optical lattice clocks compatible with Sr and Yb atoms by sharing the vacuum chamber and optics. In this research, we develop a Sr/Yb compatible clock system based on a cryogenic Sr optical lattice clock. Moreover, ^{171}Yb atoms have a nuclear spin of $1/2$, which enables a simple clock operation with smaller number of laser sources.

In last few years, we confirmed that our Yb optical lattice clock had an uncertainty of 10^{-17} . In addition, we demonstrated frequency comparison between our Yb and Sr optical lattice clocks via an optical frequency comb with the uncertainty of 10^{-17} . In 2016, we evaluated a high-order light shift, which presently limits the accuracy of our Yb optical lattice clock. By making the intensity of the optical lattice laser 8 times higher, we successfully evaluated the light shift with an uncertainty of 10^{-18} .

3. Development of optical lattice clocks with mercury and cadmium atoms (Ohmae, Matsuura, 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 suppress emission of BBR. Another approach to reduce the uncertainty of BBR shifts is to use atomic species that are insensitive to the BBR. As mercury (Hg) and cadmium (Cd) atoms have an order of magnitude smaller sensitivity to the BBR than Sr and Yb atoms, we have started the development of optical lattice clocks with Hg and Cd atoms, which should enable 18-digits uncertainty even in a room-temperature environment. One of the challenges in realizing Hg and Cd clocks lies in the development of laser sources. As the transitions used for cooling, trapping and spectroscopy are in the ultraviolet (UV) region, UV lasers with high power and high stability are necessary. For the development of stable laser sources in the UV region, laser technologies such as frequency doubling of master oscillator and power amplifier (MOPA) systems are exploited.

Our Hg optical lattice clock achieved a total uncertainty of 10^{-16} . In order to improve the accuracy, we plan to evaluate the uncertainty of the light shift, which mainly limits present accuracy of the Hg lattice clock. To this end, in 2016, we have successfully constructed an optical cavity in a vacuum chamber to enhance optical lattice intensity. In the Cd experiment, we have achieved a magneto-optical trap with narrow line transition last year. This year, we successfully observed the clock transition in the ^{113}Cd isotope. We will prepare atoms in an optical lattice and measure the magic wavelength of Cd.

Principal Investigator

香取 秀俊 Hidetoshi Katori

Research Staff

高本 将男 Masao Takamoto
山口 敦史 Atsushi Yamaguchi
ダス マジ Manoj Das
赤塚 友哉 Tomoya Akatsuka
ニルス ネッツ Nils Nemitz
牛島 一朗 Ichiro Ushijima

Students

小峯 祐介 Yusuke Komine
高橋 忠宏 Tadahiro Takahashi
松浦 正俊 Masatoshi Matsuura
木村 友哉 Tomoya Kimura
中西 健 Ken Nakanishi
水嶋 玲 Ray Mizushima
柳本 凌達 Ryotatsu Yanagimoto

Assistant and Part-timer

小林 恵 Megumi Kobayashi

Visiting Members

大前 宣昭 Noriaki Ohmae
高野 哲至 Tetsushi Takano