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．水銀原子を用いた超高精度光格子時計の実現
３．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
４．異原子種時計比較による物理定数の恒常性の探索

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、GPS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の開発（高本、牛島、Das、香取）
ストロンチウム（Sr）原子を用いた光格子時計では、「秒」を定義するセシウム原子時計の精度を超える16桁超の精度が各国で次々と実現されている。このような高い精度を実現する一方で、その精度は、周囲環境から放射される黒体輻射により生じる周波数シフト（黒体輻射シフト）の不確かさによって制限されている。我々は、この黒体輻射の影響を低減するために、低温環境下で動作する光格子時計の開発を行っている。超高真空槽内におよそ70 Kまで冷却可能な恒温槽を設置し、その中で黒体輻射シフトを低減した高精度分光を行う時計システムを構築した（図1）。低温(95 K)および室温環境下で動作する2台の時計の周波数を比較することにより、室温における黒体輻射シフトを厳密に評価することに成功した。一方、2台の時計を低温温度で動作させて時計比較を行うことにより、2時間の平均化時間で2×10^{-18}の安定度を実現した。さらに、11日間にわたる周波数比較により、2台の時計が18桁精度で一致していることを実証した。2014年度には、Sr光格子時計と後述するHg、Yb光格子時計との周波数比計測を行い、異原子種時計比較を実現した。

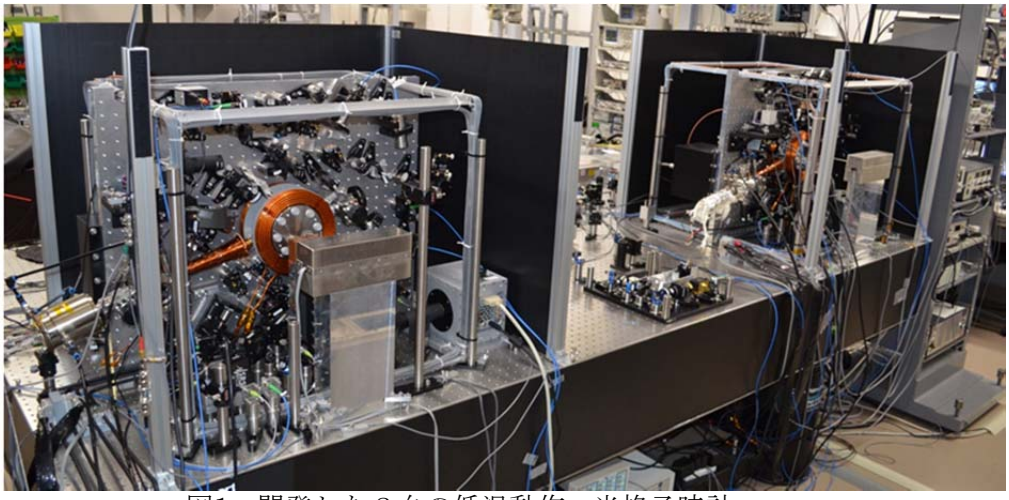
図1：開発した２台の低温動作・光格子時計。

２．水銀光格子時計の開発（大前、山中、Puruttivarasin、香取）

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。その有力な候補である水銀（Hg）原子は、ストロンチウム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、室温においても18桁精度が実現できる可能性がある。そこで我々は、水銀原子を用いた光格子時計の開発を進めている。水銀原子の遷移周波数は、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。2014年度には、前年度までに開発した時計システムを本格稼動させ、16桁超の精度で水銀原子光格子時計の評価を行った。さらに、光周波数コムを用いてHg/Srの周波数比の測定を3か月にわたって行い、SI秒の定義の実現精度を超える16桁超の不確かさでの測定を実現した。

３．イッテルビウム光格子時計の開発（Nemitz、大久保、香取）

イッテルビウム（Yb）原子は、遷移周波数、遷移強度、飽和蒸気圧等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、光学系でSr/Yb原子デュアル光格子時計を構築可能である。さらに、^{171}Yb同位体は核スピンが1/2であり、核スピン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など、時計システムの可搬化にも適した原子種である。2014年度は、Sr時計システムの1台をSr/Ybデュアル光格子時計として動作するように改造し、時計の本格稼動を実現した。さらに、Yb時計の精度評価を行い、光周波数コムを用いてSr時計との周波数比の測定に着手した。

４．高精度原子時計の周波数比較による物理定数の恒常性の探索（高本、Das、牛島、大前、山中、Puruttivarasin、Nemitz、大久保、山口、香取）

物理学の基礎は、「物理定数は定数」という暗黙の仮定のもとに成り立ってきた。例えば、微細構造定数$\alpha(=e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$の恒常性は、原子時計がその構成原子種に依らず同じ時を刻み続けることを保障する。上記テーマで開発しているストロンチウム−水銀−イッテルビウム光格子時計を用いた原子時計の精密比較を行うことによって、物理定数の恒常性の検証を行うことを計画している。2014年度には、16桁超の精度で水銀/ストロンチウムの時計周波数比の測定を実現した。今後さらなる精度向上により、より厳密な物理定数の恒常性の検証実験を行う。

Key Sentence:

１．Development of optical lattice clocks with strontium atoms in a cryogenic environment
２．Development of optical lattice clocks with mercury atoms
３．Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms
４．Investigation of the constancy of fundamental constants

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 outcome of such research, are a key technology that supports our modern society, such as navigation with GPS 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 cryogenic environment (Takamoto,

Ushijima, Das, Katori)

The fractional uncertainty of optical lattice clocks based on strontium atoms has reduced to below 10^{-16} and surpassed the accuracy of Cs clocks, which provide the current definition of the "second". At such high level of precision, the blackbody radiation (BBR) shift becomes a dominant source of uncertainty for strontium optical lattice clocks. To tackle the uncertainty of the BBR shift, we have developed cryogenic optical lattice clocks where lattice-trapped strontium atoms are probed inside a cryogenic environment. With a target of 18-digits clock precision, we have built a pair of clock setups with a cryogenic chamber to allow highly-precise spectroscopy free from the BBR perturbations (Fig. 1). Frequency difference between the two clocks operating respectively in a cryogenic and room-temperature environment resolved the BBR shift with high precision. Also, by comparing two clocks both operating in a cryogenic environment, the relative stability reached 2×10^{-18} in an averaging time of 2 hours and the agreement between the two clocks reached 4×10^{-18}. In fiscal year 2014, we have demonstrated frequency comparisons between such cryogenic Sr clock with Hg and Yb clocks as described in the following sections.

2. Development of optical lattice clocks with mercury atoms (Ohmae, Yamanaka, Puruttivarasin, Katori)

Another approach to reduce the uncertainty of BBR shifts is to use the atomic species that have smaller sensitivity to the BBR. As mercury atoms have an order of magnitude smaller sensitivity to the BBR than strontium atoms, we have started the development of optical lattice clocks based on mercury atoms, which may allow achieving 18 digits uncertainty even in a room-temperature environment. The main challenge for the realization of mercury clocks is the development of laser sources. As the main transitions of mercury atoms lie in the ultraviolet (UV) region, UV lasers with high power and stability are necessary for cooling, trapping and spectroscopy. For the development of stable laser sources in the UV region, laser technologies such as frequency doubling of master oscillator and power amplifier (MOPA) system and the frequency synthesis with optical frequency combs are exploited. In fiscal year 2014, we evaluated the uncertainty of the clock below 10^{-16} and started the frequency comparison with strontium optical lattice clocks. The frequency comparison yielded the frequency ratio between Hg and Sr clock transitions with the fractional frequency uncertainty of 10^{-16} and its reproducibility was confirmed for duration of three months.

3. Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms (Nemitz, Ohkubo, Katori)

As ytterbium (Yb) atoms have similar properties to strontium atoms in transition wavelengths, dipole moments for cooling transition, and the saturated vapor pressure, this allows the realization of dual optical lattice clocks with Sr and Yb atoms by sharing the vacuum chamber and optics. ^{171}Yb atoms have a nuclear spin of 1/2, which enables a simple clock operation for future portable clocks. In fiscal year 2014, we have modified a cryogenic Sr clock to be compatible with a Yb clock and started its operation. We evaluated the uncertainty of the Yb clock and started the frequency comparison with a Sr clock using an optical frequency comb.

4. Investigation of the constancy of fundamental constants and relativistic geodesy using optical lattice clocks (Takamoto, Das, Ushijima, Ohmae, Yamanaka, Puruttivarasin, Nemitz, Ohkubo, Yamaguchi, Katori)

The foundations of physics and atomic clocks implicitly assume the time and space invariance of fundamental constants. Among these is the dimensionless quantity known as the fine structure constant $\alpha(= e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c)$. Atomic clocks should keep the same time regardless of their constituent elements if α is constant, but the constancy of α is still a debatable issue. Precise comparisons of atomic clocks support such challenges; testing the coupling between electromagnetic constants (such as α) and gravity and the constancy of the fundamental constants. Through the frequency comparison of strontium, mercury and ytterbium based optical lattice clocks at 10^{-18} uncertainty, we plan to explore the constancy of fundamental constants. In fiscal year 2014, we realized the frequency ratio measurement between Hg and Sr clocks with the fractional frequency uncertainty of 10^{-16}. Further improvement of ratio measurement will provide more stringent limit on the temporal variation of fundamental constants.

Principal Investigator

香取　秀俊　　Hidetoshi Katori

Research Staff

高本　将男　　Masao Takamoto
山口　敦史　　Atsushi Yamaguchi
ﾀﾞｽ　ﾏﾉｼﾞ　　Manoj Das
赤塚　友哉　　Tomoya Akatsuka
ﾆﾙｽ　ﾈﾐｯﾂ　　Nils Nemitz
ﾀﾈ　ﾌﾟﾙﾃｨﾊﾞﾗｼﾝ　Thaned Puruttivarasin

Students

牛島　一朗　　Ichiro Ushijima
山中　一宏　　Kazuhiro Yamanaka
大久保　拓哉　　Takuya Ohkubo
岡場　翔一　　Shoichi Okaba
ﾊﾞﾗｰｽﾞ　ｼｬﾝﾄﾞｰﾙ　Balazs Sandor
小山内　貴幸　　Takayuki Osanai
林田　慧太朗　　Keitaro Hayashida
佐藤　洋介　　Yousuke Sato
吉田　征弘　　Masahiro Yoshida
浅田　史音　　Shion Asada
佐伯　悠介　　Yusuke Saiki
小峯　祐介　　Yusuke Komine

Assistant and Part-timer

小林　恵　　Megumi Kobayashi

Visiting Members

大前　宣昭　　Noriaki Ohmae
高野　哲至　　Tetsushi Takano
金田　有史　　Yushi Kaneda