

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：

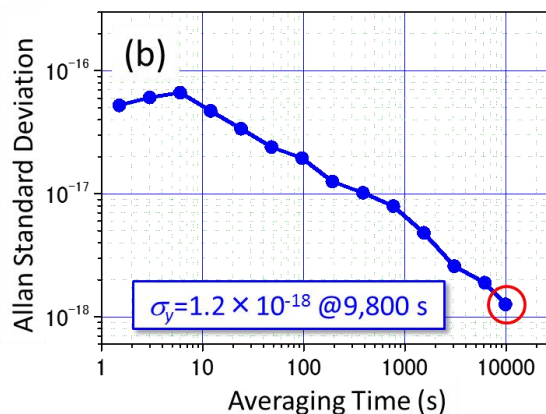
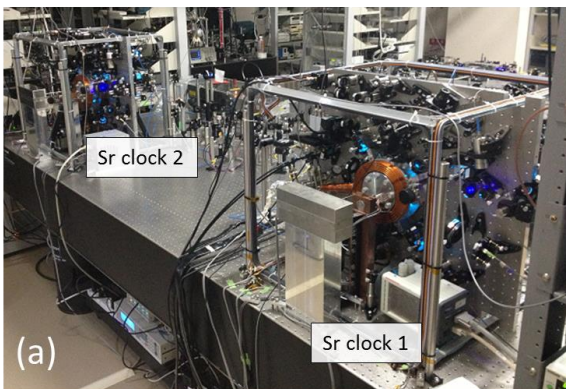
量子エレクトロニクス、原子時計、レーザー冷却、極低温原子衝突、量子縮退原子気体、量子計測、量子情報、光格子時計、魔法波長

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、Manoj、大久保、香取）

光格子時計の研究は、これまでに主としてストロンチウム (Sr) 原子を用いて実証、開発が進められ、その安定度は、平均時間1,000秒で 10^{-17} に達し、原子数1,000個の量子限界にまで到達している。このような精度において現在の時計の不確かさを決める最大の要因は、周囲環境から放射される黒体放射により生じるシュタルクシフト（黒体放射シフト）の不確かさである。我々は、この黒体放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。超高真空槽内に低温まで冷却可能な恒温槽を設置し、その中で黒体放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 [下図(a)]。低温・室温環境下で動作する2台の時計の周波数比較により、黒体放射シフトを厳密に評価することに成功した。さらに、2台の時計をともに低温環境下で動作させて時計周波数比較をすることによって、10,000秒の平均時間で 1×10^{-18} の安定度を実現し [下図(b)]、2台の時計が 2×10^{-18} の精度で一致していることを実証した。



2. 水銀光格子時計の開発（大前、山中、香取）

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1桁程度小さいため、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。水銀原子で時計を実現する際に必要となる遷移波長が、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、半導体レーザーやその非線形波長変換、光周波数コムを利用した周波数シンセサイズなどのレーザー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ている。現在、これらの開発されたレーザー光源を用いて、水銀原子の冷却、トラップ、時計遷移の精密分光に成功し、ストロンチウム光格子時計と周波数比較をすることにより、15桁精度での周波数計測を実現している。また、光格子レーザーの魔法波長を精密に測定することにより、先行実験よりも2桁近く高い精度で魔法波長を決定した。

3. イッテルビウム光格子時計の開発 (Nemitz, Manoj, 大久保, 高本, 香取)

イッテルビウム (Yb) 原子は、冷却遷移の波長、遷移強度、飽和蒸気圧など、ストロンチウム原子と類似のパラメータをもつため、同一の真空装置、光学系を用いて、Sr/Yb原子デュアル光格子時計を構築可能である。さらに、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など、時計システムの可搬化にも適した原子種である。また、Yb原子は、凝縮体の生成にも適しており、精密分光と凝縮体物理を融合した新しい物理を探索できる可能性を秘めている。2013年度には、Yb時計に必要なレーザー光源および原子源の開発を行ない、時計実験に着手した。

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, 牛島, 大前, 山中, Nemitz, Manoj, 大久保, 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。2013年度、には、15桁の精度で水銀/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 outcome of such research, are a key technology that supports our modern society, such as navigation with GPS and synchronization of high-speed communications networks. In 2001, we proposed a new atomic clock scheme, the “optical lattice clock,” which may allow us accessing to 18-digit-precision 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, Manoj, Ohkubo, Katori)

The fractional stability of optical lattice clocks based on strontium atoms has reached 10^{-17} for an averaging time of 1,000 s, which corresponds to the quantum limit of observing 1,000 atoms. In such high level of precision, the blackbody radiation (BBR) shift comes to dominate the sources of uncertainties for strontium optical lattice clocks. We started the development of cryogenic optical lattice clocks where lattice-trapped strontium atoms are surrounded by a cryogenic environment to drastically reduce the BBR shift. Targeting 18-digits clock precision, we have developed cryogenic optical lattice clocks that allow clock operation free from the BBR perturbations [Fig. (a)]. Frequency difference of two clocks in a cryogenic and room-temperature environment determined the BBR shift with high precision. By comparing two clocks operated in a cryogenic environment, the relative stability reached 1×10^{-18} with the averaging time of 10,000 s [Fig. (b)] and the agreement reached 2×10^{-18} .

2. Development of optical lattice clocks with mercury atoms (Ohmae, Yamanaka, 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 transition wavelengths of mercury atoms lie in the ultraviolet (UV) region, the 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 Er-doped fiber combs are exploited. With the development of such laser systems, we have succeeded in cooling, trapping and spectroscopy of mercury atoms, and started the frequency comparison with strontium optical lattice clocks. The frequency comparison yields the fractional frequency uncertainty of 10^{-15} and the improvement of the determination of magic wavelength with two orders of magnitude higher accuracy than the previous experimental result.

3. Development of optical lattice clocks with ytterbium atoms (Nemitz, Manoj, Ohkubo, Takamoto, 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. Furthermore, the condensation of Yb atoms will enable to explore the high-precision spectroscopy in combination with the condensed-matter physics. We have developed the laser system and atom source, and started the clock experiment.

4. Investigation of the constancy of fundamental constants and relativistic geodesy using optical lattice clocks (Takamoto, Ushijima, Ohmae, Yamanaka, Nemitz, Manoj, Ohkubo, 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 controversial issue. An interesting question is whether these clocks tick the same way as the others throughout the year as the gravitational potential from the sun changes. 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 the 10^{-18} uncertainties, we plan to explore the constancy of fundamental constants.

Principal Investigator

香取 秀俊 Hidetoshi Katori

Research Staff

高本 将男 Masao Takamoto
山口 敦史 Yamaguchi Atsushi
ダス マノジ Das Manoj
赤塚 友哉 Tomoya Akatsuka
ニルス ネミツ Nils Nemitz

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
尾野 仁深 Hitomi Ono
バラズ シェントール Balazs Sandor
小山内 貴幸 Takayuki Osanai
林田 慧太朗 Keitaro Hayashida
岡田 彪利 Ayato Okada
岡本 拓也 Takuya Okamoto
林 佑樹 Yuki Hayashi

Assistant and Part-timer

小林 恵 Megumi Kobayashi

Visiting Members

追田 武雄 Takeo Oita
大前 宣昭 Noriaki Ohmae
高野 哲至 Tetsushi Takano
金田 有史 Yushi Kaneda
麻生 洋一 Yoichi Aso