

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. 超高精度原子時計を用いた相対論的測地学および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、相対論的測地学

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、大久保、香取）

これまでに光格子時計の研究は、主としてストロンチウム原子を用いて実証、開発が進められ、その安定度は現在、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、周囲環境からの黒体輻射に起因する周波数シフト（黒体輻射シフト）の不確かさである。我々は、18桁精度の光格子時計を目指して、黒体輻射を低減する低温環境下で動作する光格子時計の開発に着手した。必要となる超高真空槽、低温冷却恒温槽、および各種安定化レーザー光源の開発を行った。これらの装置を用いてストロンチウム原子の冷却、トラップ、時計遷移分光に成功し、現在、低温・室温環境で動作する2台の時計周波数比較による黒体輻射シフト評価を行っている。

2. 水銀光格子時計の開発（大前、山中、Thoumany、Rosi、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原子では、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桁精度を実現可能になる。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。水銀原子のスペクトルは、主に紫外領域にあるため、原子の冷却、トラップ、時計遷移分光には、狭スペクトル線幅の紫外光源の開発が不可欠である。半導体レーザーやファイバーレーザー、非線形波長変換等の光源技術を駆使して高安定紫外レーザー光源の開発を行った。現在、それらレーザー光源を用いて、水銀原子の冷却、トラップ実験に成功し、時計遷移の分光実験に向けた準備を行っている。

3. 高精度原子時計の周波数比較による相対論的測地学および物理定数の恒常性の探索（赤塚、高本、大前、Das、Thoumany、香取）

光格子時計が実現する18桁の時間計測では、時計を置く高さを1cm上げれば時計が進み、人が歩く速さで動かせば時計が遅れるのが最後の桁で確認できる。原子時計はもはや時間合わせの道具ではなく、曲がった時空を照らし出すプローブの役割を担うことになる。重力シフトを高精度に検出することは、地下資源の探索や地殻変動を観測する、相対論的測地学ともいべき新たな分野を切り拓くツールとして期待される。我々は、このような応用を実証すべく、遠隔地にある2台の光格子時計の周波数比較に

よる重力ポテンシャル差の高精度・実時間計測実験を計画している。本年度は、光格子時計の開発と並行して、理化学研究所-東京大学間の周波数伝送用光ファイバーリンクの構築を行った。

一方で、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。テーマ1、2で開発中のストロンチウム-水銀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。

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. Investigation of the constancy of fundamental constants and relativistic geodesy using optical lattice clocks

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, Das, Ohkubo, Katori)

The fractional stability of optical lattice clocks based on strontium atoms reached 10^{-17} for an averaging time of 1,000 s, which corresponds to the quantum limit of observing 1,000 atoms. In such precision, the blackbody radiation (BBR) shift becomes the main source of clock uncertainties. We started the development of cryogenic optical lattice clocks where lattice-trapped strontium atoms are surrounded by 70 K walls to dramatically reduce the BBR shift. Targeting 18-digits clock precision, we have developed ultrahigh vacuum chambers, cryogenic environment and frequency stabilized lasers. Using these devices, we have succeeded in cooling and trapping of strontium atoms and started the evaluation of BBR shift by comparing two clocks in cryogenic and room-temperature environment.

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

In view of the BBR shifts, mercury atoms offer an order of magnitude smaller BBR shift than strontium atoms; therefore the mercury atoms may allow achieving 18 digits uncertainty even at room temperature operation. We started the development of optical lattice clocks based on mercury atoms. The realization of a mercury atomic clock presents many challenges. The light sources required are in the ultraviolet (UV) region. As UV lasers are not directly available, we use frequency doubling stages to convert IR radiation into UV. We have developed a 254-nm laser to cool and trap mercury atoms, a 363-nm laser for optical lattice trapping, and a 266-nm laser to probe the clock transition. We have succeeded in cooling and trapping mercury atoms, and have started to probe the clock transition.

3. Investigation of the constancy of fundamental constants and relativistic geodesy using optical

lattice clocks (Akatsuka, Takamoto, Ohmae, Das, Thoumany, Katori)

In timekeeping at the 10^{-18} uncertainty that optical lattice clocks will provide in the near future, clocks will read out the advance of time by placing them 1 cm higher on the Earth's surface. Then the role of the atomic clocks can be a probe for the curved space-time due to the gravity, rather than a tool for sharing accurate time. Such sensitivities to gravitational potentials will find new applications in relativistic geodesy, to observe crustal movements and to search for resources underground. In order to demonstrate such applications, we plan a precise frequency comparison of two clocks in remote sites, RIKEN and the University of Tokyo. Along with the development of optical lattice clocks, we developed the optical fiber link for frequency transfer between the two sites.

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 and mercury 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

ダス マノジ Das Manoj

ソーマニー ピエール アントニ スマック Pierre Antoine
Somnuck Thoumany

赤塚 友哉 Tomoya Akatsuka

ロッシ ガブリエル Rosi Gabriele

Students

橋口 幸治 Koji Hashiguchi

牛島 一朗 Ichiro Ushijima

山中 一宏 Kazuhiro Yamanaka

クリステンセン ビヤーク タカシ ロイレ Bjarke Takashi

Røjle Christensen

大久保 拓哉 Takuya Ohkubo

岡場 翔一 Shoichi Okaba

尾野 仁深 Hitomi Ono

小山内 貴幸 Takayuki Osanai

柏木 麗奈 Reina Kashiwagi

早川 悠介 Yusuke Hayakawa

林田 慧太朗 Keitaro Hayashida

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

于 得水 Deshui Yu

金田 有史 Yushi Kaneda