

香取量子計測研究室

主任研究員 香取 秀俊 (D.Eng.)



(0) 研究分野

分科会:物理、工学

キーワード:量子エレクトロニクス、原子時計、量子計測、
光格子時計、相対論的測地学

(1) 研究背景と研究目標

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。光格子時計は、原理的には1秒の計測時間で18桁の精度での時間計測を可能にする。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。

(2) 2021年度成果と今後の研究計画

(A) 相対論的測地応用に向けた可搬型光格子時計の開発

一般相対性理論によると、重力ポテンシャルの異なる場所では時間の進み方が異なる。すなわち、標高の異なる2地点に精密な時計を設置すると、両地点の標高差が、時計の進み方の差として検出される。たとえば、 1×10^{-18} (精度18桁)の相対周波数精度をもった原子時計を使えば、地上では1 cmの標高差を検出することができる。このような「相対論的測地学」を今後さらに発展させるには、光ファイバーで互いに接続された光格子時計ネットワークが必須である。そして、そのようなネットワークを構築するためには、より小型化・可搬化された光格子時計の開発が不可欠である。

そこで今年度は、可搬型光格子時計のさらなる小型化をすすめた。開発した光格子時計の物理パッケージの容量は49 L (重さ 45 kg)である。これは、2019年に東京スカイツリーで実施した測定で使用した装置の6分の1の容量 (4分の1の重さ)である。またこの光格子時計を動作させ、平均化時間1時間で周波数安定度が 5×10^{-18} に到達していることを確認した。

今後は、可搬型光格子時計を遠隔地に運び、光ファイバーネットワークに繋いで時計比較を行う。プレート運動や火山活動などによる地殻の数センチメートル精度の上下変動の観測など、地球物理学への応用にも取り組む計画である。

(B) 原子核時計実現に向けたトリウム229イオントラップ装置の開発

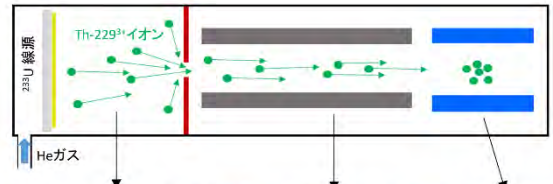
トリウム229は、共鳴エネルギーがわずかに8.3 eVと異常に低い原子核遷移をもつ。8.3 eVは波長に換算すると149 nmの真空紫外であり、レーザーを作ることができる。すなわち、トリウム229は、原子核を直接レーザー分光できる。その応用の1つが、この原子核遷移の共鳴周波数を基準とする周波数標準「原子核時計」である。我々は、原子核時計の実現を目指し、そのプラットフォームとなるトリウム229のイオントラップ装置を開発している。

原子核時計を実現するためには、トリウム229イオンをトラップした後、レーザー冷却する必要がある。そこで我々は、レーザー冷却に利用可能な電子遷移をもつ価数3のトリウム229イオン (Th-229^{3+}) をトラップする計画である。図1に、装置の概念図を示す。まず、トリウム229イオンを得るため、ウラン233 (U-233)を用意する。ウラン233はアルファ崩壊してトリウム229に壊変するので、金属基板表面にウラン233を電着した線源を用意しておくこと、線源表面から反跳イオンとしてトリウム229イオンが放出される。こうして飛び出してきたトリウム229イオンを、ヘリウ

ムバッファガスとの衝突で冷却した後、RFカーペットと呼ばれるイオン収集装置でイオンビームとして取り出し、イオントラップまで輸送する。

今年度は、トリウム²²⁹の代わりに、トリウム²³²同位体を使い、図1のイオントラップ装置の開発を進めた。トリウム²³²は、トリウム²²⁹と比べて、自然界に豊富に存在するため入手しやすく、また放射能が弱く扱いやすいからである。実験では、ウラン²³³線源のかわりに固体のトリウム²³²を置き、レーザーアブレーション法によりトリウム²³²イオンを生成した。図1②のイオン輸送部分を四重極質量分析器として動作させることで、生成されたイオンを分析し、トリウム²³²の価数1, 2, 3のイオンが生成されていることを確認した。このうちの価数1のイオンをトラップし、その電子遷移をレーザー分光した。

今後は、価数3のトリウム²³²をトラップしレーザー冷却を実現した後、トリウム²²⁹イオンをトラップし、原子核時計の実現にむけてトリウム²²⁹イオンのレーザー冷却実験をすすめる計画である。



① イオンの生成+減速 → ② イオンの輸送 → ③ トラップ

図1： 開発を進めているTh-229イオントラップ装置の概念図。

(3) 研究室メンバー (2021年度)

(主任研究員) 香取秀俊

(専任研究員) 高本将男, 山口敦史

(アシスタント) 小林恵

(4) 発表論文等

1. “Transportable Strontium Optical Lattice Clocks Operated Outside Laboratory at the Level of 10^{-18} Uncertainty”, N. Ohmae, M. Takamoto, Y. Takahashi, M. Kokubun, K. Araki, A. Hinton, I. Ushijima, T. Muramatsu, T. Furumiya, Y. Sakai, N. Moriya, N. Kamiya, K. Fujii, R. Muramatsu, T. Shiimado, and H. Katori, *Adv. Quantum Technol.* **4**, 2100015 (2021).
2. (Plenary Talk) “Transportable Optical Lattice Clocks to Test and Use Gravitational Redshift”, Hidetoshi Katori, *IMEKO XXIII World congress (IMEKO2021)*, August 30 - September 3, 2021, online virtual conference.
3. “Test of gravitational redshift with optical lattice clocks and their applications to relativistic geodesy”, Masao Takamoto, *Sixteenth Marcel Grossmann Meeting*, Online, July (2021).
4. “Development of an RF-carpet gas cell to obtain an ion beam of thorium-229”, A. Yamaguchi, Y. Shigekawa, H. Haba, M. Wada, and H. Katori, *ViCPEAC2021*, Online, July (2021).
5. “Estimation of radiative half-life of ^{229m}Th by half-life measurement of other nuclear excited states in ^{229}Th ”, Y. Shigekawa, A. Yamaguchi, K. Suzuki, H. Haba, T. Hiraki, H. Kikunaga, T. Masuda, S. Nishimura, N. Sasao, A. Yoshimi, and K. Yoshimura, *Phys Rev C* **104**, 024306 (2021).

Laboratory Homepage

https://www.riken.jp/research/labs/chief/qtm_metrol/index.html

<http://www.amo.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>