



(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。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）や原子核時計の開発など、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) 2020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車載型光格子時計の開発

一般相対性理論の効果により、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。地球上では、標高が高いほど時間は速く進む。したがって、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(重力シフト差)として検出される。たとえば、 1×10^{-18} の精度をもった原子時計を使えば、1 cm の標高差を検出することができる。我々は、このような高精度な時計を、相対論的な効果を利用した標高測定「相対論的測地技術」へと実用化するため、時計の小型化・可搬化を行っている。その一環として現在、18桁精度の超高精度な車載型光格子時計の開発をすすめている。

図1(左図)は、開発した車載型時計の写真で、右図はこの時計を実験室に設置した光格子時計と光ファイバで繋ぎ、周波数比較を行った結果である。車載型時計でも実験室に設置した時計と同等の性能が得られており、約1時間の積算時間でcm台の精度の標高差が計測された。

今後は、車載型光格子時計を遠隔地に運び、光ファイバネットワークに繋いで時計比較を行うことで、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取り組む。また、さらなる小型化、可搬化により、GNSS(全球測位衛星システム)や高感度重力計と補完的に利用できるジオポテンシャル・センサー・ネットワークの確立を目指す。

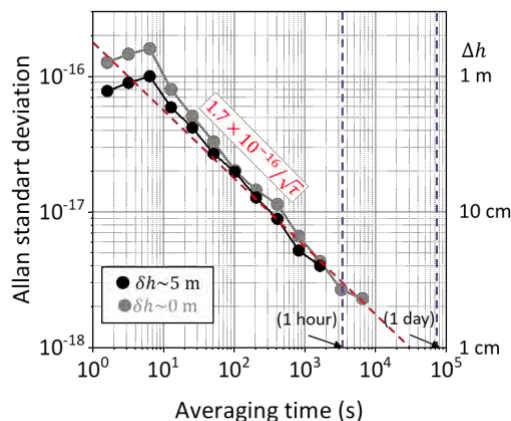


図1 : (左) 車載型光格子時計. (右) 車載型光格子時計と実験室の時計の周波数比較の結果(黒色の点). 実験室に設置した時計同士(灰色の点)と同等の性能が得られており、約1時間の積算時間でcm台の精度の標高差が計測された。

(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

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」の実現に向けて、Th-229（トリウム229）をイオントラップに捕獲し、その量子状態をレーザーにより精密に制御・測定する技術の開発をすすめている。

開発しているイオントラップ装置の概念図を図2に示す。まず①で、U-233（ウラン233）のアルファ崩壊の過程で反跳イオンとして得られるTh-229イオンを、ヘリウムガスとの衝突を利用して減速させる。減速したTh-229イオンを、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、輸送し②、トラップする③。

2020年度は、①にテスト用のイオン源（セシウムイオン源）を設置し、①-③すべての装置を連動して動作させ、イオンをトラップする技術を確立した。また、Th-229イオンのトラップ実験に向け、U-233をチタン薄膜に均一に電着したTh-229イオン源を作製し、線源から出てくる放射線の強度を測定することで、毎秒 10^5 個程度の（本研究にとっては十分な量の）Th-229イオンが放出されていることを確認した。このTh-229イオン源を①に設置し、①および②でTh-229イオンビームを取り出し、そのエネルギーを測定した結果3~4 eVであり、今後トラップするのに十分な低エネルギーであることを確認した。

今後は、この低エネルギーTh-229イオンビームを③のトラップ領域に導入し、Th-229イオンをトラップし、レーザー分光およびレーザー冷却実験をすすめる。本研究で作成したU-233線源から放出されるTh-229イオンのうち2%（すなわち毎秒2000個程度）は、原子核がアイソマー状態のイオンである。したがって、将来はこのアイソマー状態のイオンをトラップし、Th-229のアイソマー状態に関する研究もめざす。たとえば、アイソマー状態の寿命測定、原子核がアイソマー状態から基底状態へ遷移する際に放出される光子のエネルギーを測定することによる遷移エネルギーの精密測定など、原子核時計の研究にとって重要な測定を行う。

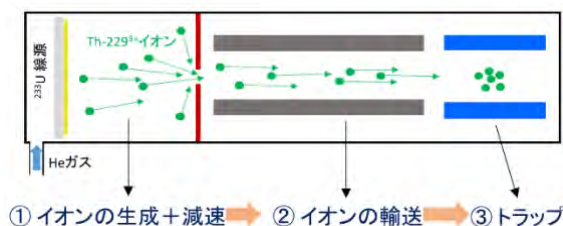


図2： 開発を進めているTh-229イオントラップ装置の概念図。

(3) 研究室メンバー（2020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. “Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clock and closure of the Hg/Yb/Sr loop”, N. Ohmae, F. Bregolin, N. Nemitz, and H. Katori, *Opt. Exp.* **28**, 15112 (2020).
2. “Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks”, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Yahagi, K. Kokado, H. Shinkai, and H. Katori, *Nat. Photon.* **14**, 411 (2020).
3. “Transportable Optical Lattice Clocks to Test Gravitational Redshift”, H. Katori, *51st Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics*, Online, June (2020).
4. “Development of transportable optical lattice clocks for geodetic applications”, M. Takamoto, *CLEO2020*, Online, May (2020).
5. “Energy of the Th-229 nuclear clock isomer determined by absolute γ -ray energy difference”, A. Yamaguchi, *GIMRT-REMAS2020*, Online, October (2020).

Laboratory Homepage

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

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