



丸文学術賞 受賞者

高本 将男

国立研究開発法人理化学研究所 香取量子計測研究室
研究員

光格子時計の実現と その高精度性実証への貢献

宇宙年齢の138億年で1秒もずれない高精度な時計の開発とその実用化を目指して

研究の背景

高精度な原子時計は、精密計測を通して科学技術の発展を支えるだけでなく、衛星搭載によるナビゲーションシステムや大容量高速通信ネットワークの構築など、現代社会を支える基盤技術として重要な役割を担っている。「秒」がセシウム原子のマイクロ波遷移の遷移周波数(～9.2 GHz)で定義された1967年以来、半世紀にわたって、セシウム原子時計が時間・周波数の基準として用いられてきた。その間にセシウム原子時計は、レーザー冷却技術の導入や原子泉型時計の開発によって、10年に1桁の割合で精度を上げ、現在ではおよそ15桁の不確かさ(3000万年に1秒のずれ)を実現し、国際原子時として全世界で共有されている。

一方、近年の原子時計の研究は、光周

波数コム、狭線幅レーザー光源、光ファイバ周波数伝送に代表される光周波数制御技術の急速な発展とともに、光周波数領域の原子遷移を基準とする光時計の開発に移行しつつある。時計の正確さは、基準とする周波数に比例するため、光周波数を基準とする光時計は、マイクロ波を基準とするセシウム時計に対して数桁の高精度化が可能である。本研究では、光格子中に閉じ込めた極低温原子を用いる光時計「光格子時計」を開発した。この手法は、レーザー光で生成した光格子内に閉じ込めた数100万個の原子の光領域の共鳴周波数を基準とすることにより、短時間で高い精度を実現できる原子時計として2001年に東京大学 香取秀俊准教授(当時)によって提案された。セシウム時計の精度をはるかに凌駕する18桁の精度(300億年に1秒のずれ)を、わずか数

秒の短い平均時間で実現可能な次世代原子時計[1, 2]として期待されている。

研究の成果

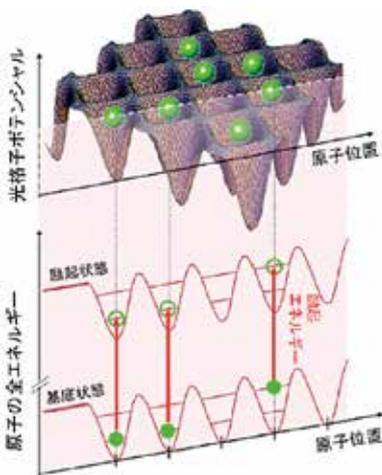
光時計の原理は、レーザー光を原子に照射し、時計の基準(振り子)となる原子の共鳴遷移に常に共鳴するように、レーザー光の周波数を制御することによって、原子固有かつ不変な周波数(時間)を実現することである。一方で、正確な時計を実現するためには、原子を取り巻く摂動を排除し、その周波数を正確に読みだす必要がある。特に重要となるのが、原子の熱運動によるドップラー効果が引き起こす周波数シフトの除去である。光格子時計では、レーザー光の干渉によって作る微小空間内に原子を閉じ込めることによって、原子の運動を完全に凍結させる。一方で、原子をレーザー

光で閉じ込めると、そのレーザー光によって原子の共鳴周波数がずれてしまうが、これを相殺するような「魔法波長」と呼ばれる特定の波長を選ぶことによって、光格子自体の影響も排除する(図1(a))。我々は、これらのスキームが実際に有効に働くことを実証するために、ストロンチウム原子の共鳴遷移を探し出し、光格子中で共鳴遷移の精密な分光が可能であることを初めて実証した[3]。さらに、ストロンチウム原子の魔法波長を決定し(図1(b))、光格子時計の初の時計動作を実現した[4]。

実現した時計の精度を評価するために、光格子時計の周波数を国際原子時へと繋ぎ、ストロンチウム原子の共鳴遷移の絶対周

図1

(a) 光格子時計の概略図[1, 2]。レーザー光の干渉パターンで生成された光格子中に原子集団を閉じ込めて、その共鳴周波数をもとに高精度な時計を構成する。



(b) 光格子レーザーによって生じる周波数シフトの波長依存性の理論曲線。基底・励起状態のシフトが等しくなる波長「魔法波長」(～800 nm)を用いることで、共鳴周波数のずれを相殺することができる。(内挿図)実験により魔法波長の存在が初めて確認された[3]。

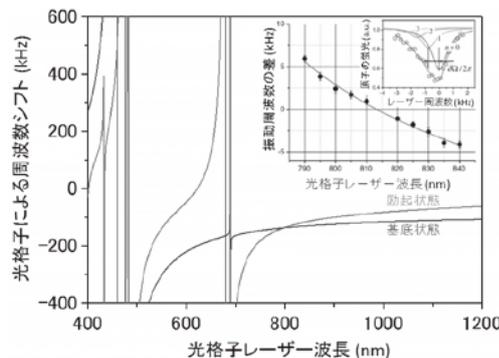
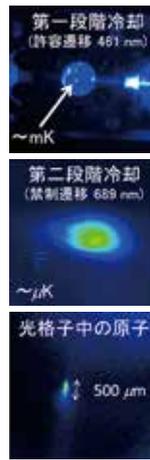
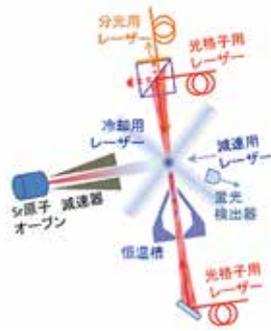
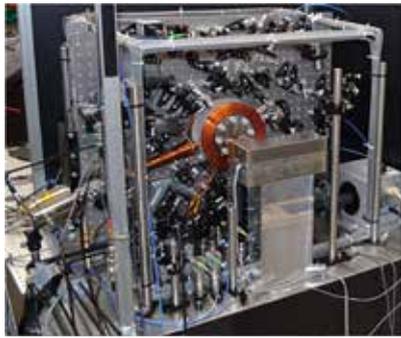


図2 低温動作型ストロンチウム光格子時計の装置概要とレーザー冷却されたストロンチウム原子。極低温までレーザー冷却されたストロンチウム原子を光格子中に捕獲し、低温に冷却した恒温槽の中で原子の共鳴遷移を高精度に分光する。



波数計測を行った[5]。この測定はその後、米、仏の研究機関の追試により再現性が確認され、2006年、「秒」の再定義の有力な候補としてストロンチウム原子を用いた光格子時計は「秒の二次表現」に採択された。また、この絶対周波数計測は、光格子時計の精度向上とともにセシウム時計の不確かさが計測精度を制限するようになり、更なる高精度な評価を行うためには、複数台の光格子時計を開発してそれらを直接比較することが不可欠となった[6]。

提案時に究極の時計精度として掲げられた18桁精度実現を妨げる最大の要因は、原子を囲む室温の壁から放射される電磁波(黒体輻射)によって生じる周波数シフトの影響であった。室温でこの影響は時計周波数の15桁目で現れるため、18桁精度実現のためには、このシフトの抑制が不可欠であった。我々は、低温環境(95 K)でストロンチウム原子を分光することによって、黒体輻射の影響を1/100に低減する低温動作型光格子時計を開発した(図2)。このような時計を2台開発し、2台の時計の周波数差を同期比較手法[7]を用いて高速かつ精密に評価することによって、シュテファン

=ボルツマンの法則に従う絶対温度の4乗に比例する黒体輻射シフトを実験的に観測することに成功し(図3(a))、2台の時計が18桁精度で一致していることを初めて実証した[8](図3(b))。

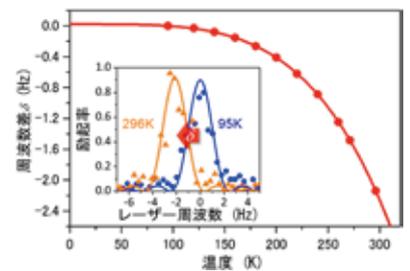
将来の展望

光格子時計は、これまでの研究の進展によって、「秒」の定義であるセシウム時計を遥かに上回る18桁精度を達成し、その原理検証がほぼ完了しつつある。次のステップは、高精度な時計の新たな応用を開拓し、その実用化を図ることである。18桁もの高い精度で時間計測が可能になると、重力による一般相対論的な効果によって、地上の時計のわずか1 cmの高さの違いを、時間の進み方のずれとして検出できるようになる。このような相対論的效果を利用すれば、高精度な時計は高精度な重力ポテンシャル計として新たな世界をプローブする精密計測ツールとなる。例えば、光格子時計をポータブル化してフィールドワークで利用できるようになれば、地下資源探査、地下空洞、マグマ溜まりの検出

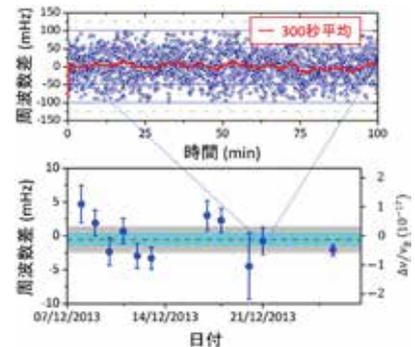
など、新たな測地技術への応用の可能性が広がる。また、高信頼化した小型時計を量産して各地に配置し、重力ポテンシャルの時間変動を連続監視することにより、地殻変動の検出、重力場の空間マッピングへの応用も考えられる。今後、時計の小型化、可搬化によって、新たな基盤技術として社会に貢献することを期待している。

本研究は、東京大学工学部物理工学科香取研究室および理化学研究所香取量子計測研究室において行われたものであり、多くの研究者および学生の協力によって得られた成果である。改めて関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

図3



(a) 黒体輻射による時計の周波数シフト。片方の時計の環境温度を95 Kで固定し、他方の温度を変化させて、その周波数差から温度依存性を測定した。



(b) 2台の低温動作型光格子時計の周波数差。11回の測定の平均により2台の時計が18桁の精度で一致していることが示された。

References(参考文献)

- [1] H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, and V. D. Ovsiannikov, "Ultrastable Optical Clock with Neutral Atoms in an Engineered Light Shift Trap," Phys. Rev. Lett. 91, 173005 (2003).
- [2] H. Katori, "Optical lattice clocks and quantum metrology," Nature Photon. 5, 203 (2011).
- [3] M. Takamoto and H. Katori, "Spectroscopy of the $1S_0-3P_0$ Clock Transition of ^{87}Sr in an Optical Lattice," Phys. Rev. Lett. 91, 223001 (2003).
- [4] M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, "An optical lattice clock," Nature 435, 321 (2005).
- [5] M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, Y. Fujii, M. Imae, and H. Katori, "Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic ^{87}Sr Isotope," J. Phys. Soc. Jpn. 75, 104302 (2006).
- [6] T. Akatsuka, M. Takamoto, and H. Katori, "Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions," Nature Phys. 4, 954 (2008).
- [7] M. Takamoto, T. Takano, and H. Katori, "Frequency comparison of optical lattice clocks beyond the Dick limit," Nature Photon. 5, 288 (2011).
- [8] I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, "Cryogenic optical lattice clocks," Nature Photon. 9, 185 (2015).