

# 光を感じない光時計

## Light-insensitive optical clock

Thomas Udem



トラップされた中性原子間の相互作用は、これまで光時計の究極的な周波数標準として使うことができなかった。うまいトラップの方法が見つければこの問題を回避でき、計時の限界をさらに広げることができるかもしれない。

Nature Vol.435(291)/ 19 May 2005

ほとんどすべての時計は二つの基本的な要素からなる。周期的に事象を発生させる「発信器」とその事象を追跡する「カウンター」である。例えば、最も古いと思われる時計、つまり日時計は地球の回転を発信器として使い、人をカウンターとして使う。クリスチャン・ホイヘンスが1656年に初めて作った振り子時計は、振り子発信器と時刻を表示する自動式の機械カウンターからなる。最近実現したものでは、*Nature* 2005年5月19日号のp.321で、高本らが計時に関する最新の技術革新について述べている<sup>1</sup>。

現代の時計は周波数の高い発信器と電子カウンターを用いる。1920年代に開発されたクォーツ時計では、小さな水晶を励起して、一般的に1秒あたり約1万回の振動を発生させる。原子時計では、原子核が原子中の電子の作る磁場によって歳差運動をする。セシウム原子時計は標準的な検出方法でこの歳差運動を追跡し<sup>2</sup>、生じた振動の信号を電子カウンターに送って、正確に9,192,631,770 サイクルごとに時計の秒針を進める。このかなり半端な値は、セシウム 133 原子の基底状態の二つのエネルギー準位間の遷移周波数に対応しており、1967年から時間の国際単位の定義となっている。現代のセシウム原子時計は $10^{15}$ 分の1の精度があり、これは時間が群を抜いて最も正確に測定できる物理量であることを意味している。

時計の不安定性（時計の「チクタク」あるいは表示時間の流れの変動）は発信器の周波数を増やすことで減らせるので、今日の最も正確なセシウム時計ですら、さらに改善する方法があるのは明らかだ。つまり、セシウム

を光発信器に置き換えればよい。このような光発信器の典型的な周波数はおよそ100THz、あるいは1000THzにすらなり（1秒あたり $10^{14}$ あるいは $10^{15}$ サイクル）、この振動は光の形で放射（あるいは吸収）される。長い間、この種の発信器の製作は対応する高速の光カウンター、あるいは時計機構よりずっと容易であった。1960年代初頭に超高速カウンター製作への取り組みが始まったが、可視光の周波数に手が届くカウンターは、1995年によく開発された<sup>3</sup>。しかしながら、このような繊細で複雑なカウンターは多数のレーザーを必要とし、複数の大きな実験室を占有するため、一般的には時計機構の選択肢として真剣に考慮されることはなかった。

1999年にフェムト秒（ $10^{-15}$ 秒）パルスレーザーが出現する<sup>4</sup>と事情が変わった。この小型デバイスは何日も連続作動できるので、光振動のカウントが簡単になり、最初の実験的な光学時計が登場した<sup>5</sup>。すぐれた光発信器には、ノイズが少なく外部からの摂動に影響されない強力な信号を得るために、鋭い遷移が必要である。ここ数年間、主に次の二つの線に沿って最適な発信器が探し求められてきた。

最初の方法では、単一イオンを電場にトラップし、レーザー冷却によって静止させる。トラップの方法とイオンを適切に選べば、クロック遷移はトラップ電場によって大きな摂動を受けず、きわめて安定したクロックレーザーによって誘発される。このクロックレーザーの周波数は光学式カウンターによって計測される。さまざまなイオンが研究対象となっていて、これまでにはすばらしい結果がもたらされている（例えば参考文献6参照）。しかし、信号

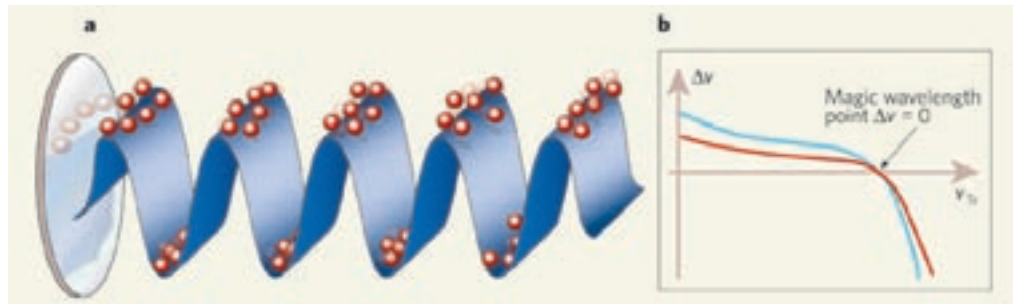


図1 高本らが発表した光発信器の詳細<sup>1</sup>。a, ストロンチウム原子(赤)は、鏡で反射されて自分自身の上に戻るレーザーが形成する定在波(青)の波頭にトラップされ、二つめのレーザービーム(図示されていない)がクロック遷移を計測する。b, トラップレーザーの周波数 $\nu_{\text{tr}}$ を適切に選ぶことによって、クロック遷移の摂動 $\Delta\nu$ を除去できる。このグラフは $\Delta\nu$ を強度の高いトラップレーザー(青)と強度の低いトラップレーザー(赤)の $\nu_{\text{tr}}$ の関数として示している。「魔法波長」では、トラップレーザーの強度とは無関係に、要求される精度に管理することがむずかしいクロック遷移の摂動が消失する。

はたった1個のイオンから発生し、長期間にわたって平均されなければならない。そのため、一定ではあるが原因のわかっていない系の周波数変動(いわゆる系統的な不確かさ)の影響を、トラップされたイオンがおおむね受けないにもかかわらず、十分に安定した計測ができないのである。そして、大きな周波数変動を伴わずに、多数のイオンをトラップすることはこれまで不可能である。

2番めの方法では、数百万個の中性原子からなる原子雲を使ってずっと強力な信号を発生させ、非常にすぐれた安定性を実現している。しかしながら、原子間衝突によって周波数に制御できない変動が生じる。すなわち、単一イオン標準は統計的な不確かさが大きく、系統的な不確かさが小さいのに対して、中性原子標準は統計的にはすぐれているが系統的な特性は不十分である。

高本ら<sup>1</sup>は、これらの原子標準双方の長所を結びつける方法を実証した。ストロンチウムの中性原子雲を、レーザーで作った定在波の波頭(波腹)に形成した別種のトラップに保持した(図1a)。これまでの試みでは、中性原子を定位置に保つのに必要なレーザーの強度は、遷移周波数に大きな摂動を起こした。トラップレーザーの強度を計測することでこのマイナスの効果を補う方法は、周波数や時間とちがって、強度が十分正確に計測できないためにうまくいかない。そのかわりに、高本らはトラップレーザーの周波数を調整して、クロック遷移の最高エネルギー準位と最低エネルギー準位を正確に同じ量だけ変動するようにし、クロック遷移周波数の変動を抑えた(図1b)。トラップレーザーの周波数は、クロック遷移への影響をクロック周波数429THzで0.001Hz以下に抑えるの

に十分な値である1MHz以内に調整された。

全光学式時計は $10^{-18}$ 以上の相対精度で、時を刻むと予想される。このような時計によって、基本的な物理理論をこれまでになくレベルで確かめることができるかもしれない。一般相対性理論や量子電気力学の検証、一部の理論で予想されている基礎定数のゆっくりとした変動の検出には、最も正確な時計がたのみの綱である。 $10^{-18}$ のレベルの精度で、地球の中心からの距離が1cmだけ異なる二つの時計の重力赤方変位を計測できるようになるだろう。さらに、電波を用いる超長基線干渉計に相当する、光を用いる計測器が実現可能になり、遠く離れた望遠鏡で集めたデータを組み合わせることによって、より分解能の高い天文画像が得られるかもしれない。また、このような時計は、衛星ナビゲーションやブロードバンド・ネットワークの同期といった、正確な計時を基盤とする技術の向上にも役立つかもしれない。 ■

マックスプランク研究所(独)、Thomas Udem

1. Takamoto, M., Hong, F.-L., Higashi, R. & Katori, H. *Nature* **435**, 321–324 (2005).
2. Ramsey, N. F. *Phys. Rev.* **78**, 695–699 (1950).
3. Schnatz, H. *et al. Phys. Rev. Lett.* **76**, 18–21 (1996).
4. Udem, Th. *et al. Nature* **416**, 233–237 (2002).
5. Diddams, S. A. *et al. Science* **293**, 825–828 (2001).
6. Margolis, H. S. *et al. Science* **306**, 1355–1358 (2004).