



SI 『秒』の改定に向けた最新の動向

安田正美

物理計測標準研究部門 時間標準研究グループ

計測標準フォーラム第14回講演会
新時代を迎える計量基本単位 – 新SIと将来技術 –
29 Sep. 2016



概要

- 「秒」の再定義に向けた活動の背景
- 光周波数標準に関する研究の進捗状況
- CCTFおよびCCL-CCTF WGFSの活動
- 「秒」の再定義に向けたロードマップ
- まとめ



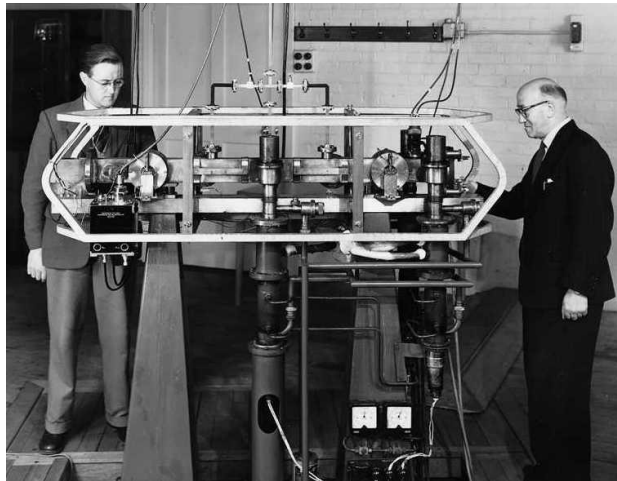
秒の定義

グリニッジ標準時

- 1884年、国際子午線会議でイギリスのグリニッジ天文台での天体観測を元に決められた時刻。
- 1 秒 = 平均太陽日の 1 / 86400



グリニッジ天文台



世界最初のCs原子時計(NPL)

原子時計への移行

1955: イギリスの国立物理学研究所(NPL)で世界最初のCs原子時計が誕生。安定度は、 10^{-10} 程度。

1967: 国際度量衡総会で、秒の定義を実現する時計としてCs原子時計が採用される。

現在の定義

“秒は ^{133}Cs 原子の基底状態の2つの超微細構造準位の間遷移に対応する放射の 9 192 631 770 周期の継続時間である。”



秒の基準の移り変わり

過去



地球の自転

1 回 = 24 時間

現在

マイクロ波



Cs

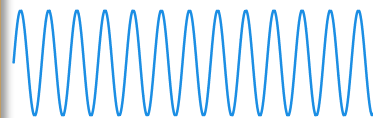
セシウム原子
の振動

(セシウム原子時計)

9 192 631 770 回 = 1 秒

将来

レーザー



Yb

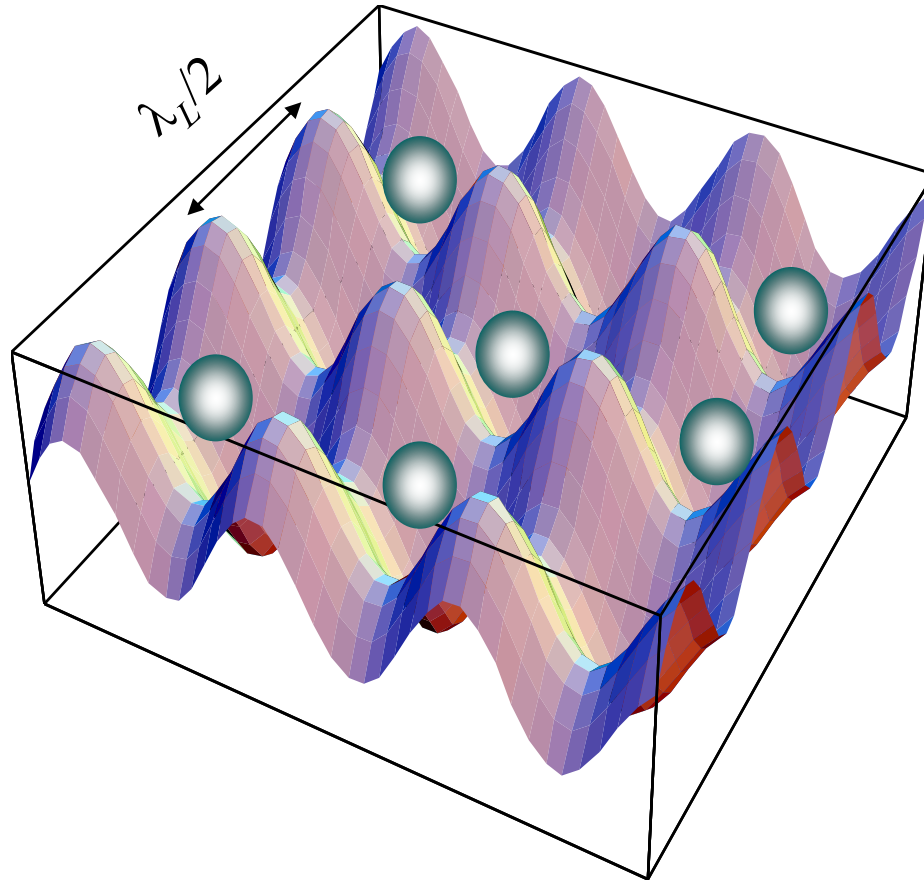
イッテルビウム原子
の振動

(光格子時計)

518 295 836 590 864 回 = 1 秒



光格子時計



東大の香取教授が発明した光格子時計。

イオントラップ、冷却中性原子とならんで光周波数標準の候補のひとつ。

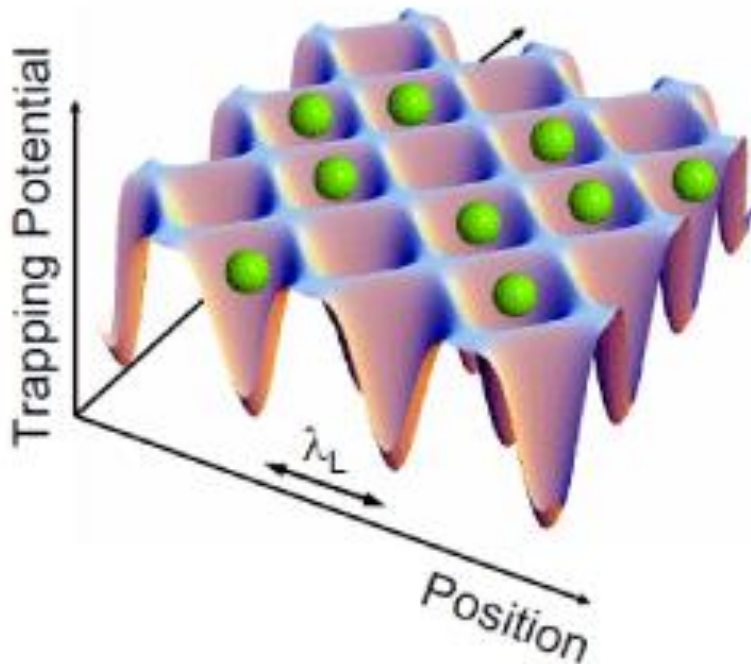
光を利用して 10^6 個の原子を捕獲するが、特別な波長を選ぶことにより原子の遷移にトラップ光が影響を与えないようにできる。

Cs 原子に代わって次世代の秒の定義を担う可能性もあり、世界中で研究されている。



光格子時計 = 日本発の光周波数標準

- 2001年： 東京大学 香取助教授（当時）による提案。
- 2003年： スロンチウム原子を用いた実証実験。
- 2006年： CIPM 秒の2次表現リストに登録。

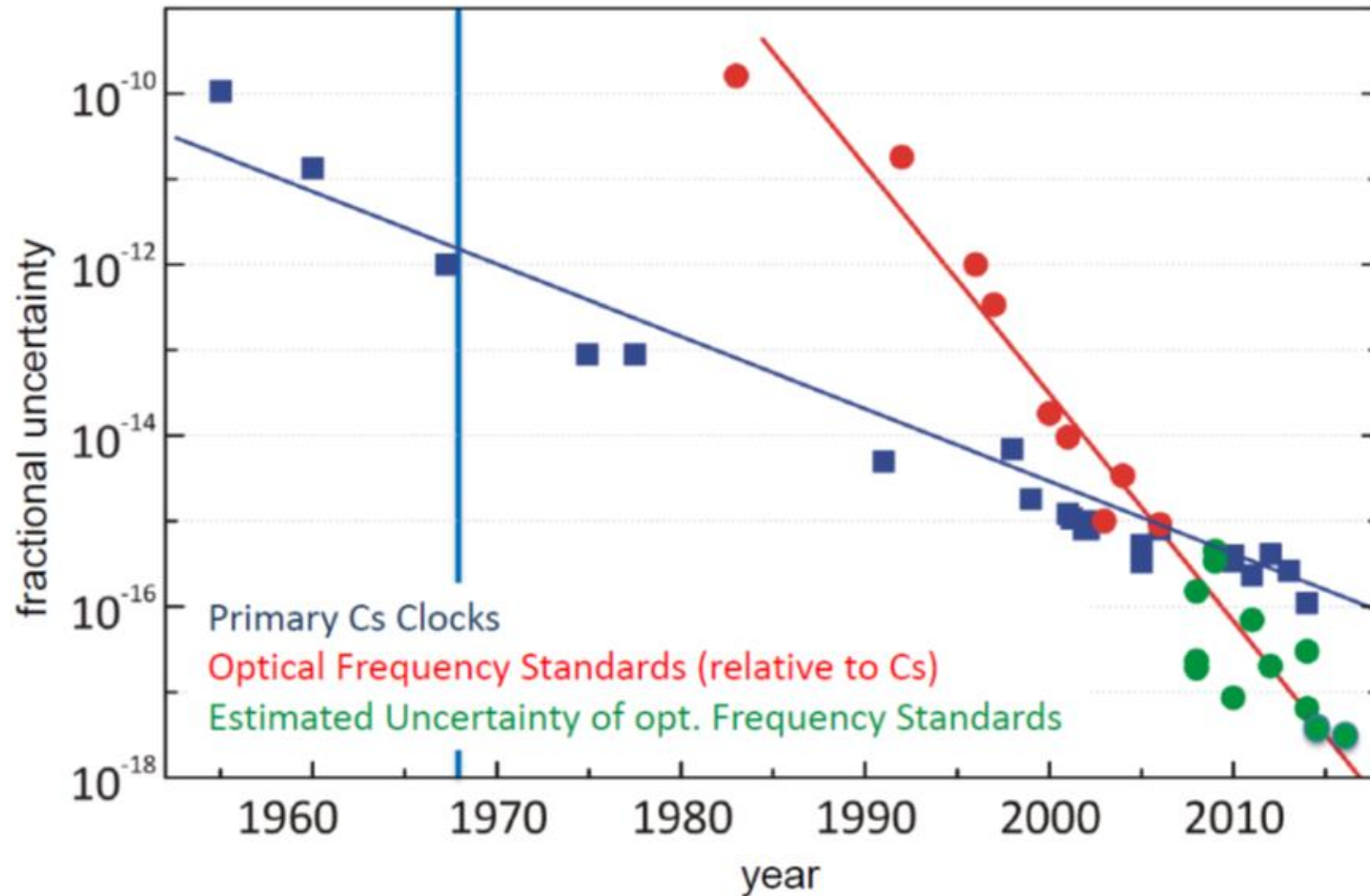


ヘンシュ教授、香取教授、ホール教授



周波数標準の相対不確かさの変遷

現行の定義の導入



CCTF Strategy Document, Annex 1 (*Towards a new definition of the second in the SI*, F. Riehle)



重力ポテンシャルによる周波数標準の違い

地表付近において高さが1 cm変化した場合。

重力の変化 $\Delta g \approx 3 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2} = 3 \mu Gal$

重力ポテンシャルの変化 $\Delta U \approx 0.1 \frac{m^2}{s^2}$

周波数シフト $\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{\Delta U}{c^2} \approx 10^{-18}$

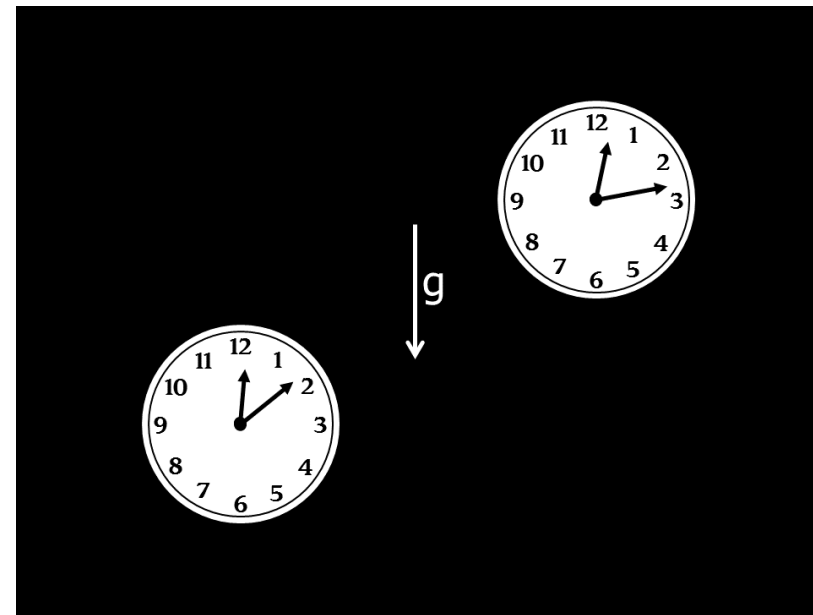
10^{-18} : cm オーダの高さの違いに相当

重力ポテンシャルの違い



時計の進み方の違い

地球上では重力から逃れられない。



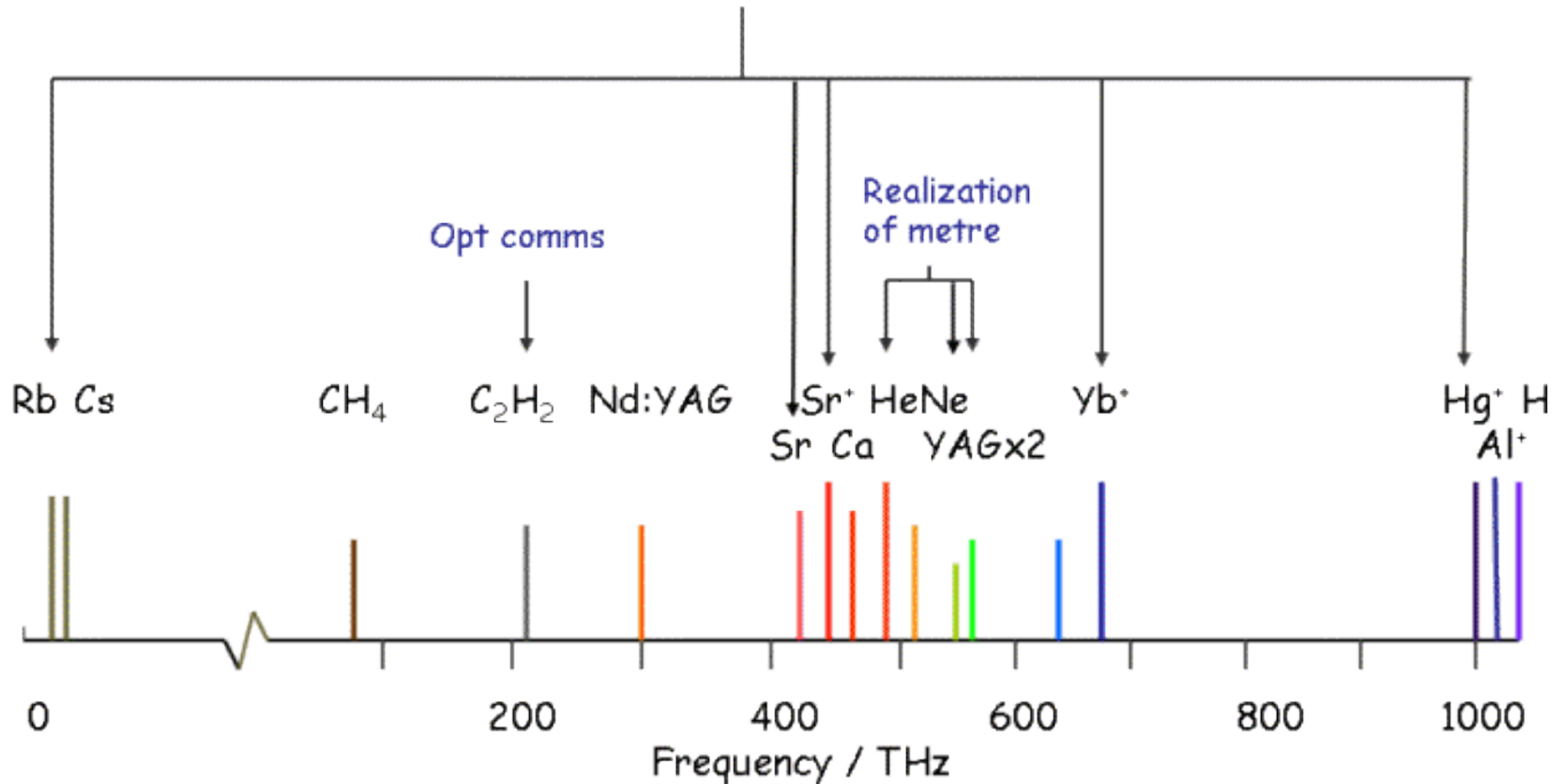


秒の2次表現と推奨される周波数

CCTF およびその傘下のCCL-CCT WGFSでは、再定義の候補となる遷移をリスト化してきた。

「秒」の2次表現

Secondary representations of second





「秒」の2次表現

- 秒を実現する周波数標準として使用可能
- 不確かさは、セシウム原子時計の不確かさより小さくすることは出来ない。
- 現在、マイクロ波周波数標準 1つと光周波数標準 7つが記載されている。

Clock	Atom or ion, Transition	Frequency / Hz	Uncertainty
Optical lattice clock	^{87}Sr 1S_0 - 3P_0	429 228 004 229 873.2	5×10^{-16}
Optical lattice clock	^{171}Yb 1S_0 - 3P_0	518 295 836 590 864.0	2×10^{-15}
Single ion optical clock	$^{27}\text{Al}^+$ 1S_0 - 3P_0	1 121 015 393 207 857.3	1.9×10^{-15}
Single ion optical clock	$^{199}\text{Hg}^+$ $^2S_{1/2}$ - $^2D_{5/2}$	1 064 721 609 899 145.3	1.9×10^{-15}
Single ion optical clock	$^{171}\text{Yb}^+$ $^2S_{1/2}$ - $^2D_{3/2}$	688 358 979 309 308.3	6×10^{-16}
Single ion optical clock	$^{171}\text{Yb}^+$ $^2S_{1/2}$ - $^2F_{7/2}$	642 121 496 772 645.0	6×10^{-16}
Single ion optical clock	$^{88}\text{Sr}^+$ $^2S_{1/2}$ - $^2D_{5/2}$	444 779 044 095 486.6	1.6×10^{-15}
Microwave clock	^{87}Rb ground-state hyperfine transition	6 834 682 610.904 310	7×10^{-16}



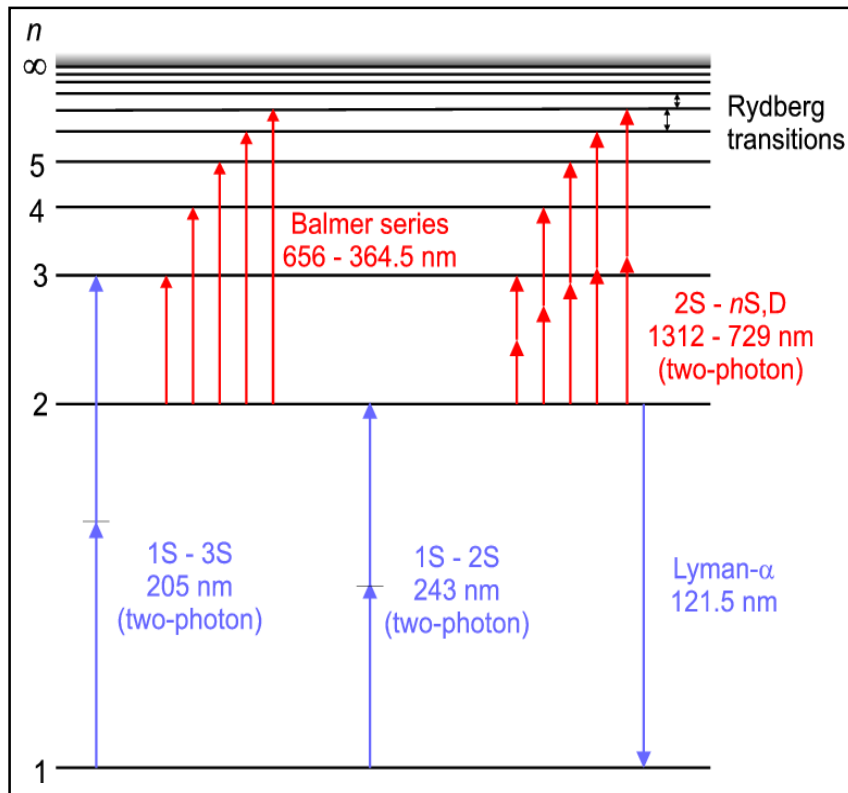
リュードベリ定数

水素原子のエネルギーレベル：

$$E_n = -\frac{R_\infty}{n^2}$$

$$R_\infty = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = \frac{m_e c \alpha^2}{2h}$$

$$R_\infty = 10\,973\,731.568\,508(65) \text{ m}^{-1}$$



f_{1S-2S} : 1.4×10^{-14} の不確かさ

R_∞ : 5.9×10^{-12} の不確かさ

リュードベリ定数に基づく十分な精度が出ない

この限界を与えているもの：

- 理論（たとえばQED理論のtwo-loop binding corrections）
- 陽子のサイズ
- 他の周波数測定



光周波数標準の比較 (Local)

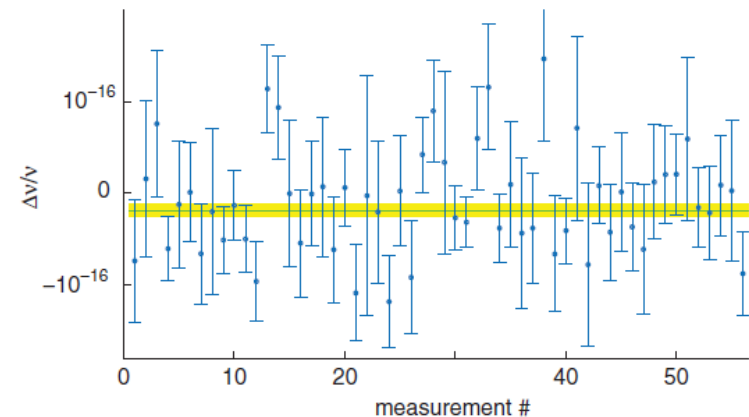
Comparison of two $^{27}\text{Al}^+$ standards at NIST:

$$^{27}\text{Al}^+ / ^9\text{Be}^+ \quad u_B \sim 2.3 \times 10^{-17}$$

$$^{27}\text{Al}^+ / ^{25}\text{Mg}^+ \quad u_B \sim 8.6 \times 10^{-18}$$

Fractional frequency difference:
 $-1.8 (\pm 0.7) \times 10^{-17}$

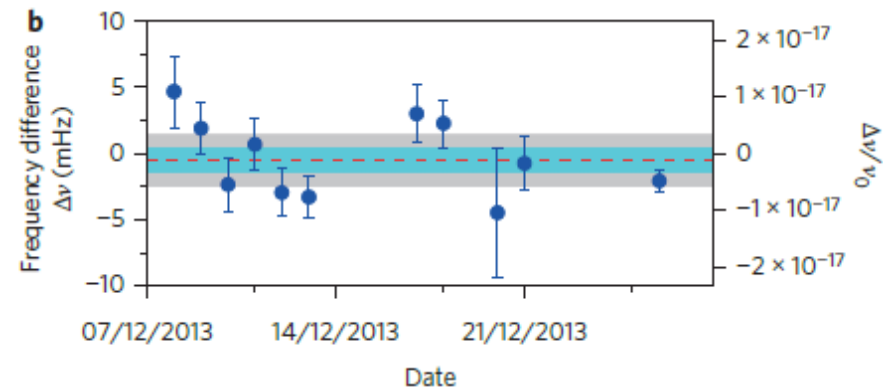
Chou *et al.*, PRL 104, 070802 (2010)



Comparison of two cryogenic ^{87}Sr lattice clocks at RIKEN:

Fractional frequency difference:
 $(-1.1 \pm 2.0(\text{stat}) \pm 4.4(\text{syst})) \times 10^{-18}$

Ushijima *et al.*, Nature Photonics 9, 183 (2015)

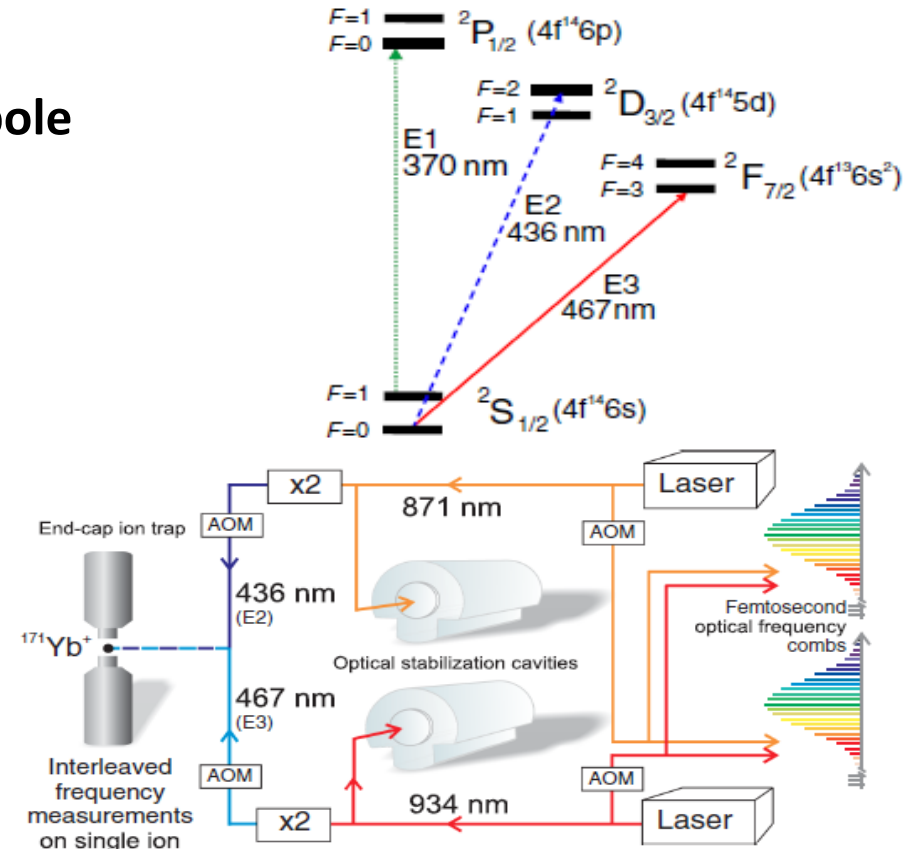
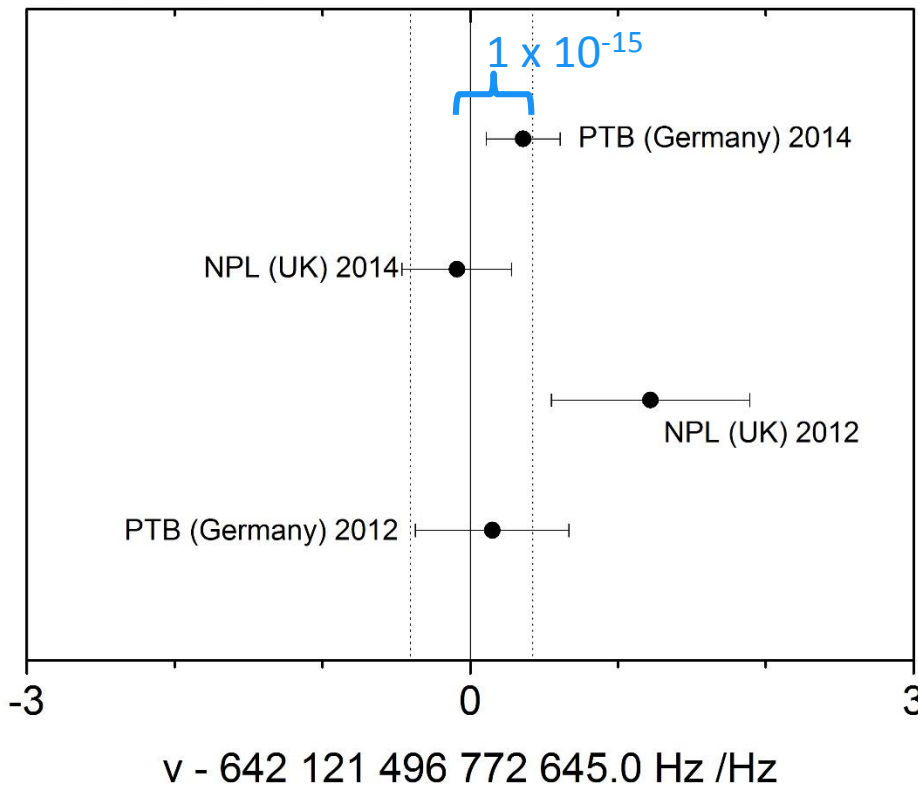




光周波数標準の比較 (Remote)

$^{171}\text{Yb}^+ 6s^2S_{1/2} - 4f^{13}6s^2^2F_{7/2}$ electric octupole

Yb^+ octupole



各研究所が保有する Cs atomic fountain
を用いた絶対周波数計測

R. M. Godun *et al.*, PRL 113, 210801 (2014), N. Huntemann *et al.*, PRL 113, 210802 (2014)



人工衛星を用いた光周波数標準の比較

PTB – NPL

GPS Precise Point Positioning (GPS PPP)

Remote comparison of $^{171}\text{Yb}^+$ (E2) optical clocks

Fractional difference: $(-1.3 \pm 1.2) \times 10^{-15}$

J. Leute *et al*, accepted for publication in IEEE UFFC (2016), DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2524988

NICT – PTB

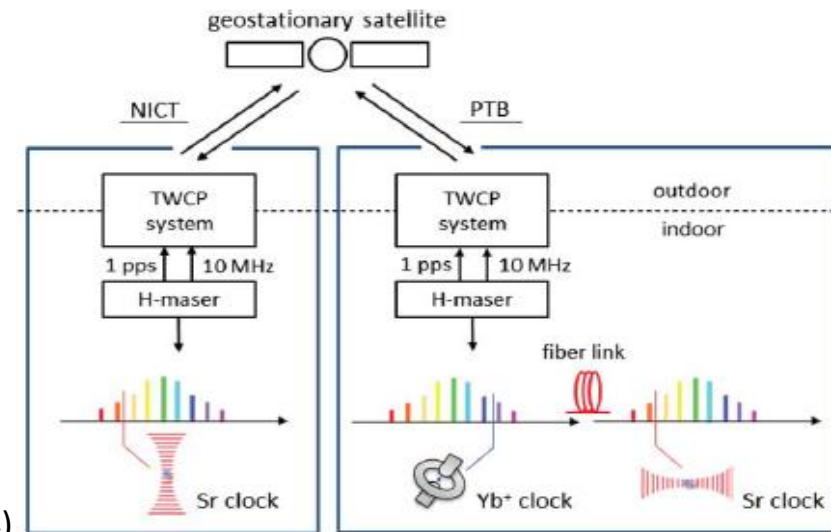
Carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer (TWCP)

Remote comparison of ^{87}Sr lattice clocks separated by a baseline of 9000 km

Fractional difference: $(1.1 \pm 1.6) \times 10^{-15}$

(averaging time 83 640 s)

H. Hachisu *et al*, Opt. Lett. 39, 4072 (2014)



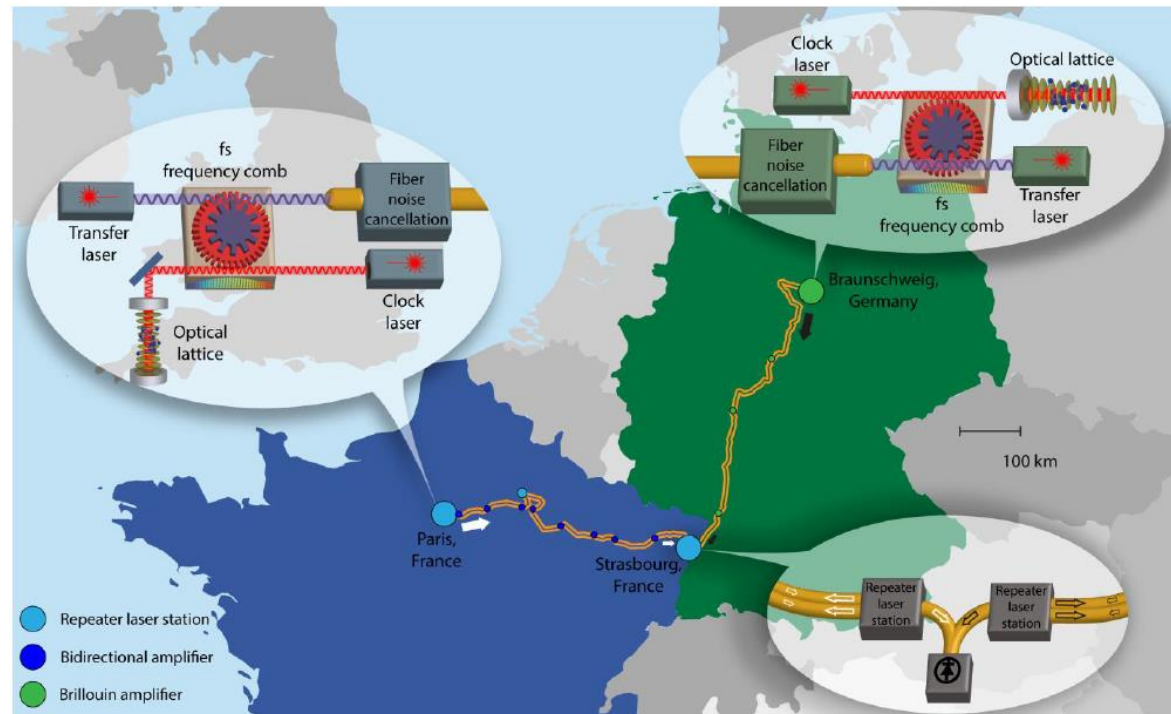


光ファイバーリンクを用いた光周波数標準の比較

PTB-SYRTE Sr lattice clock comparison:

Total optical fibre length
= 1415 km

Optical clock agreement at the
 5×10^{-17} level
(averaging time 125 000 s)



C. Lisdat *et al.*, arXiv: 1511.07735 (2015)

NPL-SYRTE optical fibre link:

Total optical fibre length \sim 750 km

Sr optical lattice clocks are being compared now



再定義のために必要な事

- 異なる研究所（特に大陸を隔てる研究所）間の光時計の比較方法の高度化
- 周波数比較の共同研究プログラムの設置
 - 光時計の信頼性の確立
 - 現在の秒の定義との比較による周波数の決定
 - 秒の再定義を推進する研究機関の参加
- 相対論的効果（重力赤方偏移等）の評価の高度化
- 光時計を国際的な時系に実装する方法とその手順の確立



CCL-CCTF WGFSの活動

2013 Prague (EFTFに合わせて開催)

- 光周波数比の測定の取り扱い
- 光周波数標準の開発の現状の確認

2014 Neuchatel (EFTFに合わせて開催)

- CCL-CCTF WGFS 2015に向けたスケジュールの確認
- 光周波数比の測定の取り扱い
- 光周波数標準の開発の現状の確認

2015 Paris, BIPM

- 新しく報告された周波数値の精査と周波数値の更新

2016 York (EFTFに合わせて開催)

- 秒の再定義に向けたロードマップの作成
- CCL-CCTF WGFS 2017に向けたスケジュールの確認



推奨される周波数値

2015 Paris, BIPM : 新しく報告された周波数値の精査と周波数値の更新

- 推奨される周波数標準の値の更新
($^{171}\text{Yb}^+$ octupole, $^{171}\text{Yb}^+$ quadrupole, $^{88}\text{Sr}^+$, $^{40}\text{Ca}^+$, ^{87}Sr , ^{171}Yb , ^{199}Hg , ^1H , ^{87}Rb microwave)
- 秒の2次表現となっている周波数標準の値の更新
(^{87}Sr , ^{171}Yb , ^{199}Hg , $^{171}\text{Yb}^+$ octupole, $^{171}\text{Yb}^+$ quadrupole, $^{88}\text{Sr}^+$, ^{87}Rb microwave)
- 新しく「秒の2次表現」に追加された光周波数標準はなかった。

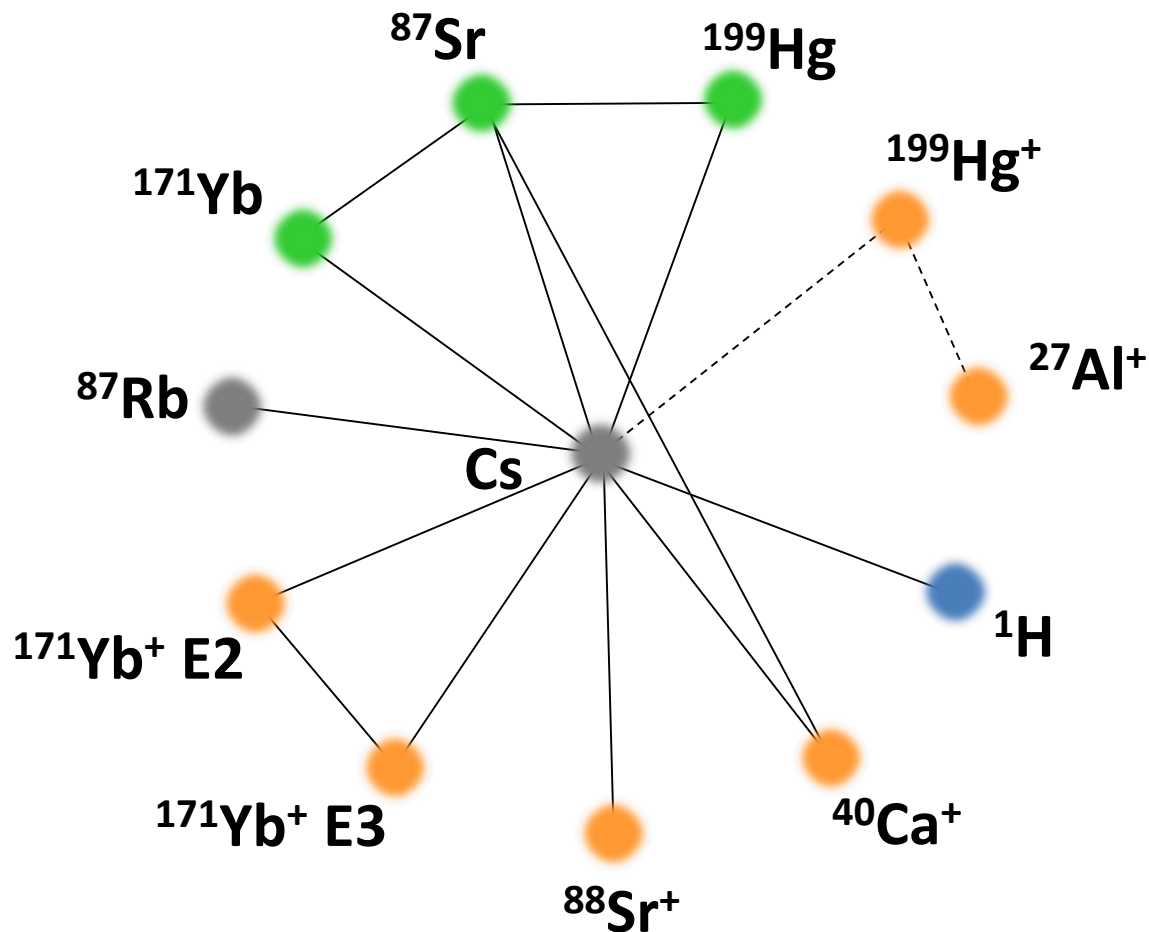
これまで、WGFSで議論されてきたデータは、一次標準器であるCs原子時計との比較であった。

今後、光周波数標準の再現性の確認には光周波数標準同士の直接比較が必要になる。



周波数比較の現状

光周波数比の直接測定：5例





周波数比の測定結果の取り扱い

いくつかの異なった測定からある周波数値比をより精度よく推定する。

例えば, v_{Yb+} / v_{Sr} は直接測定する事も可能であり、また他の周波数比の値の組み合わせから求める事も可能。

e.g.
$$v_{Yb+} / v_{Sr} = (v_{Yb+} / v_{Yb})(v_{Yb} / v_{Sr})$$

or
$$v_{Yb+} / v_{Sr} = (v_{Yb+} / v_{Cs})(v_{Cs} / v_{Sr})$$

or
$$v_{Yb+} / v_{Sr} = (v_{Yb+} / v_{Sr+})(v_{Sr+} / v_{Yb})(v_{Yb} / v_{Sr})$$

etc.

それぞれの周波数比の値を得るために複数のアプローチがあるので、各周波数標準を独立に扱う事はもはや困難。単純な加重平均では決められない。

- CODATAにおいて基礎物理定数の決定に用いられる最小二乗法に基づく手続きを踏襲
- 報告された周波数比の測定値も含めて計算



更新された推奨周波数の値

Atom/ion	Transition	Frequency / Hz	Uncertainty
⁸⁷ Sr	5s ² ¹ S ₀ – 5s5p ³ P ₀	429 228 004 229 873.2	5 x 10 ⁻¹⁶
¹⁷¹ Yb	6s ² ¹ S ₀ – 6s5p ³ P ₀	518 295 836 590 864.0	2 x 10 ⁻¹⁵
¹ H	1S – 2S	1 233 030 706 593 514	4.5 x 10 ⁻¹⁵
¹⁹⁹ Hg	6s ² ¹ S ₀ – 6s6p ³ P ₀	1 128 575 290 808 154.8	6 x 10 ⁻¹⁶
¹⁷¹ Yb ⁺	6s ² S _{1/2} – 5d ² D _{3/2} electric quadrupole	688 358 979 309 308.3	6 x 10 ⁻¹⁶
¹⁷¹ Yb ⁺	6s ² S _{1/2} – 4f ¹³ 6s ² ² F _{7/2} electric octupole	642 121 496 772 645.0	6 x 10 ⁻¹⁶
⁸⁸ Sr ⁺	5s ² S _{1/2} – 4d ² D _{5/2} electric quadrupole	444 779 044 095 486.6	1.2 x 10 ⁻¹⁴
⁴⁰ Ca ⁺	4s ² S _{1/2} – 3d ² D _{5/2} electric quadrupole	411 042 129 776 398.4	1.2 x 10 ⁻¹⁴
Rb	ground state	6 834 682 610.904 310	7 x 10 ⁻¹⁶

CIPM 2015で承認



「秒」の再定義に向けた条件

A new definition should therefore take place
as early as possible and as late as necessary.

① 不確かさの低減：

～ 10^{-18} の相対不確かさの光時計が3つ以上出現する事。

② 同等性の確認：

3つ以上の研究所において～ 10^{-18} の相対不確かさで、光時計の同等性を確認できる事。

③ 現行の定義との継続性：

Cs atomic fountain との比較において、 3×10^{-16} 以下の相対不確かさで、周波数が決定出来る事。

④ 新定義の実装：

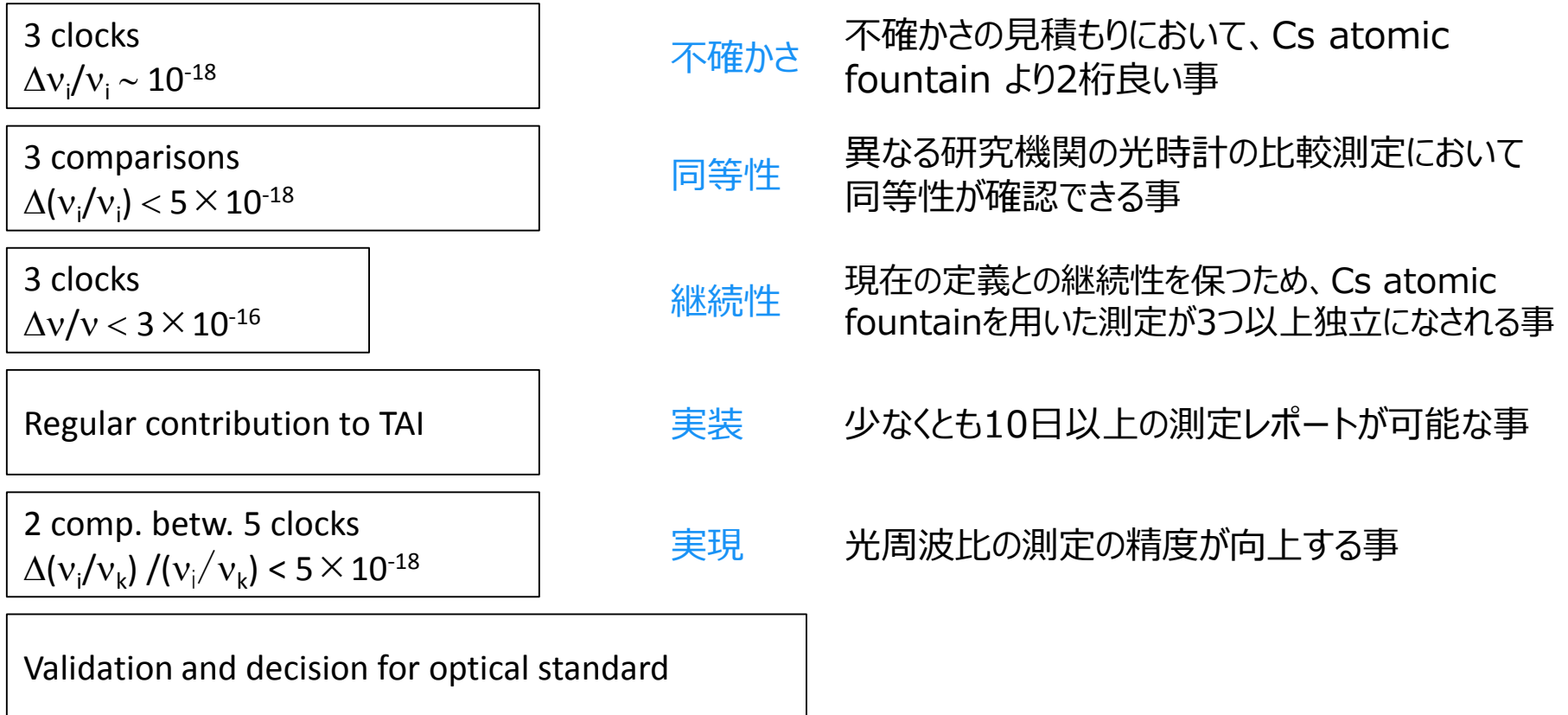
国際原子時(TAI)への定期的な貢献が可能になる事。

⑤ 新定義の実現：

異なる光時計の周波数比が2つ以上の研究機関で 5×10^{-18} の以下の相対不確かさで測定される事。そして、この様な周波数比の測定の実績が5つ以上になる事。



「秒」の再定義に向けたロードマップ



CCTF Strategy Document, Annex 1 (*Towards a new definition of the second in the SI*, F. Riehle)



まとめ

- 10^{-18} 台の光周波数標準が現れたことで、再定義の機は熟しつつあるとの認識。
- 10^{-18} 台の不確かさが一つの目標値。
- 「秒」の再定義においては、CCL-CCTF WGFSで議論されてきた「秒の2次表現」など、光周波数標準を用いた定義になる予定。
- 「秒」の再定義において、特定の光遷移が選択された後も、他の光遷移を用いて「秒」を実現する事が出来るように準備。
- 光周波数標準の比較方法の高度化が重要。
- 光周波数標準を用いた時系の構築が重要。