

2015年5月15日 電波航法研究会

時間をめぐる話題

歴史から最新研究まで

国立研究開発法人情報通信研究機構

細川瑞彦

時間とは何か？ → 如何に時間を計るか？ 積算時と力学時

積算時: 周期が(ほぼ)一定と思われる現象の繰り返し回数

振子、地球回転、水晶の振動、量子遷移による電磁波の周波数...

原子時 (国際原子時): 精密科学、天文学、標準時

世界時 (地球の自転): 天文学、測地学、測位、航法など

力学時: 力学系に対し、運動方程式を立てて解き、
時刻 t とその時の事象を対応させることで決められる時系
理想的な力学系として、太陽系天体の運行
暦表時、JPL DEシリーズ

同等性は？ 我々はまだ全てを理解していない
一致の確認は永遠の課題

SI単位系の変遷

18世紀 フランス革命時代 最初は地球主義

長さ → 地球の子午線 標準の示し方が凄く大変

時間 → 地球の自転 分かりやすい

質量 → 長さ³と水

19世紀 原器主義へ より身近に

王政復古？

1889年、メートル原器とキログラム原器

科学技術的には大きな変更

複製品(各国原器)でやや便利？

時間の原器は相変わらず地球

20世紀 物理法則主義へ 量子標準、相対論 民主制

21世紀 基礎定数主義？ 原理主義は一見美しいが...

暦

- 大辞林によると
 1. 時の流れを年、週、日、などを単位として区切った体系、暦法
 2. 一年間の月日、七曜、祝祭日、干支、月齢、日の吉凶などを日を追って記したもの。カレンダー。
- 基準は太陽、月、地球 物理的意味より実用優先

太陽	恒星年	→	太陽年(回帰年)	約20分
月	恒星月	→	(平均)朔望月	約2.2日
地球	恒星日	→	(平均)太陽日	約4分
- 日食、月食、星食
黄道、白道、赤道 サロス周期、エクセリグモス
- 長期的な変化は、年、月は10桁目、日は8桁目

時間計測の近代史

力学 ガリレオ、ニュートン、...

1665年、**ホイヘンス**の振り子時計 → 均時差の表を出版
太陽暦の非一様性-地球の公転軌道が楕円
天体暦の構築

1760年、**ハリソン**のクロノメーター、正確な航海
大航海時代の革新技術

経度への挑戦(D.ソベル、角川文庫)

運動方程式と時間、エネルギー保存と時間
天体の運行 海王星の発見(1846)

19世紀末 リーフラーの振り子時計
1920頃**ショート**自由振り子、1928**マリソン**水晶

20世紀、相対論と量子論の発展
→ 時間と空間の基準にも大きな影響

暦表時の構築 自転から公転へ

ニューカム(1835-1909) 太陽系天体の運行の観測と精密計算

地球自転が徐々に遅くなっていること(11世紀の記録との比較)

数年に1秒～1億分の1(8桁目)くらいが変化

水星近日点移動の残差: 100年に43秒角(太陽近く、7桁目)

光速度の精密測定にも大きな貢献

天体力学に基づく「暦表時」を時間の定義に(50年代)

ニューカムの式を基本として、ニュートン力学と月の利用、精度10桁くらい

太陽系の主要天体の運動方程式を解き、位置変化を予想

地球の公転運動は太陽、月、木星、金星、火星などの影響で変化

これらの中では月の位置変化が最速

→ 星食(月が恒星を隠す)が一番良い時計の針

1954 IAU, 1956 CIPM, 1960 CGPM → 1960～1967、秒の定義に

暦表時の不便さ(時計の針が見えない)

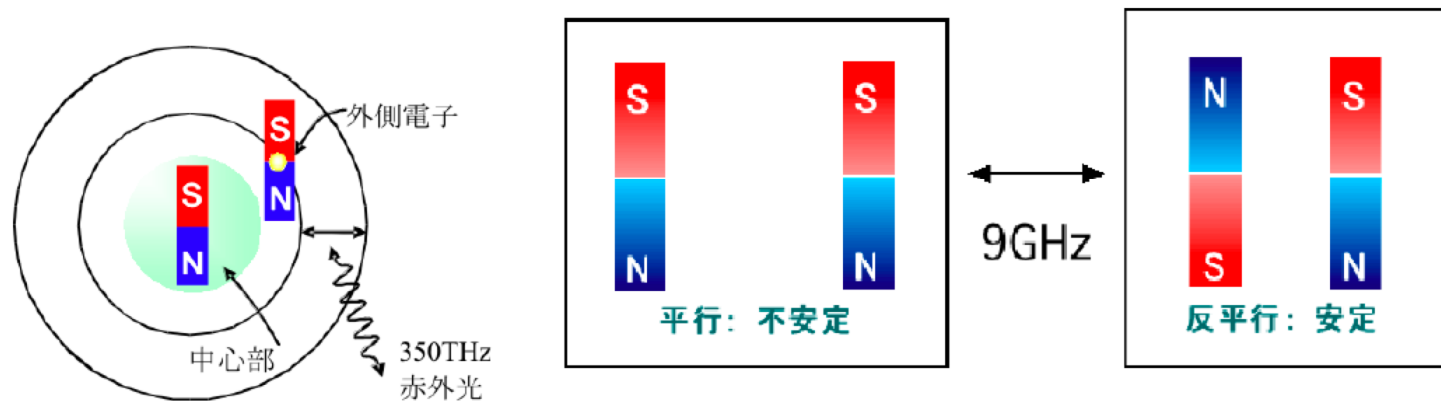
原子時計の開発急進: マイクロ波技術、量子エレクトロニクス
1955年に初のセシウム原子時計(英国)

時間の単位、秒の定義(1967年)

秒は、セシウム133の原子の基底状態の二つの超微細構造準位間の遷移に対応する放射の周期の9192631770倍の継続時間である

1955～1958、3年間にわたる暦表時との比較(米、海軍天文台)

セシウム133の時計遷移は 9192631770 ± 20 Hz



セシウム原子のイメージ

時のトリビア？

時刻帯	Time Zone	ある経度範囲で同じ時刻を使う場合の帯
経帯時	Zone Time	時刻帯で使われる時刻(多くは中央経度)
法定時	Regal Time	各国の法律で定める標準時
世界時	Universal Time	(8桁) 地球の自転
協定世界時	Coordinated Universal Time	
暦表時	Ephemeris Time	(10桁) 太陽系の天体運行、力学
原子時	Atomic Time	(15桁以上) 原子時計

天文学大事典 地人書館

地球時 Terrestrial Time TT, 地心座表時 Geocentric Coordinate Time TCG,
Barycentric Dynamical Time TDB, ...

ウィキペディア 時刻系

原子時計って何？ - 共鳴

- ものは、形状や性質により、ある周波数の振動だけを
感じ響かせることがある → **共鳴**

共鳴をうまく活用している例
楽器、特にリコーダーや
フルートなどの管楽器

極微で宇宙普遍の原子は
鋭い共鳴現象を起こす
ことがある （量子力学）



アルト・リコーダー（上）と
ソプラノ・リコーダー（下）

原子時計って何？ - 時計遷移

- 原子の**共鳴**現象の中には、特別に鋭く**非常に正確な周波数**のものがある。
この共鳴は**時計遷移**と呼ばれる。

- セシウム原子：特定周波数の電波を感じて電子の磁気の向きが変わる。

電気双極子遷移は強い(広帯域)が、電気四重極子、磁気双極子遷移は弱い(**禁制**)

原子の時計遷移の共鳴周波数を探し出し、
共鳴電波が何回振動したかを数えることで、
宇宙のどこでも正確な時計が作れる。

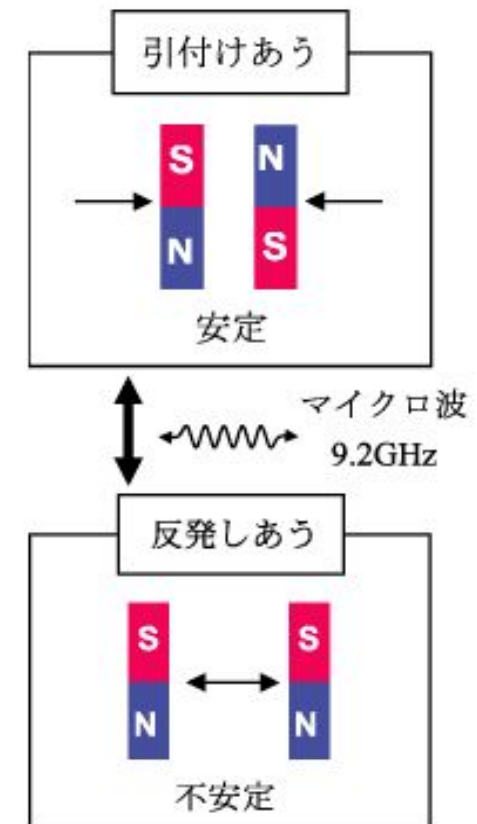
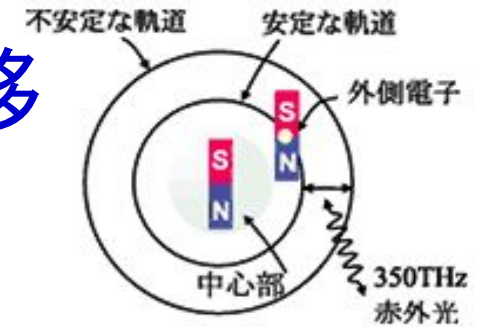


図1
セシウム原子の電子の状態

原子時による秒と新たなメートルの定義の構築

原子時計の開発(50年代) 1949 アンモニアメーザー時計
1955 エッセンのCs時計(英NPL)
原理はラムゼー

1955-58 3年間に亙る原子時(英NPL)と暦表時(米USNO)の比較
セシウム原子の超微細構造遷移の際に吸収放出される電磁波の周波数
9192631770+-20 Hz 1958年に判明、1967～秒の定義に

1960年 クリプトンランプによるメートルの新定義
クリプトン86原子の準位 $2p^{10}$ と $5d^5$ の間の遷移に対応する
光の真空中における波長の1,650,763.73倍

1983年 1秒の299 792 458 分の1の時間に
光が真空中を伝わる行程の長さ

量子標準の意義: 原器(王様)不要、誰でもどこでも技術さえあれば(民主的?)

なぜ **Cs133**、**マイクロ波**(超微細構造)?

量子力学

水素同様、外殻**電子が一個**だけ:量子遷移が**シンプル**

H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr(放射性)

I 族原子の中で、**重くて**止めやすく、融点も低い

質量数が奇数で、同位体が少ない

非常に**線幅が狭い**(寿命が長い)、精密測定可能

十分に狭い線幅の量子遷移のある原子、イオンは多数

当時、マイクロ波技術はあったが、**光の技術は未発達**

周波数と時間、評価の尺度

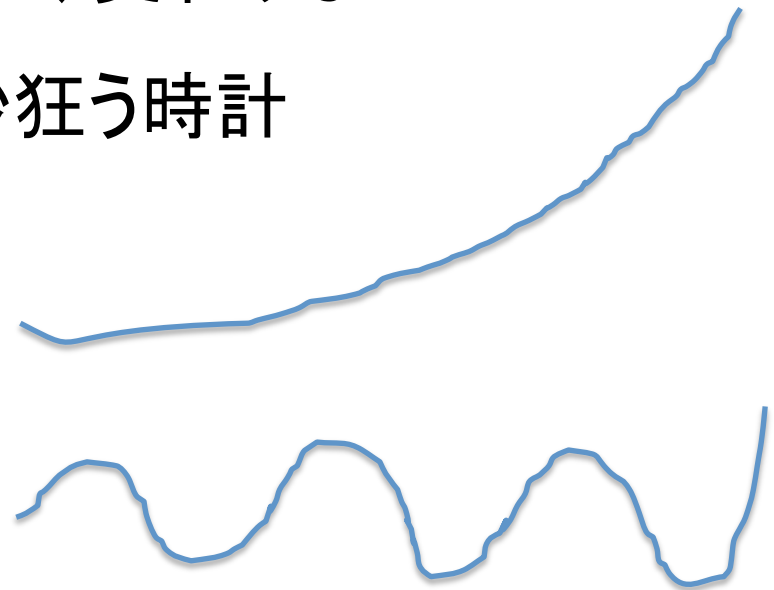
三つの要素 確度、安定度、評価の単位期間

確度 定義に対してどこまで正確か

安定度 ある期間と次の期間で、変わりにないか

止まっている時計と毎日1秒狂う時計

時計ごとに、安定度も確度も、
評価の単位期間に依存



原子時計と一次周波数標準器

定義の条件: 海拔0m地点、真空中、絶対零度、電磁場なし、静止

現実の測定: 海拔85m、ほぼ真空、摂氏37度、磁場あり、 $\sim 200 \text{ m/s}$

通常の**原子時計**は、
条件の違いによるずれを考えない:
連続運用、**安定度**を重視

実用車



一次周波数標準器は全ての要因を測定し、
自力で正しい周波数を決定する。
確度を重視

様々な誤差要因の測定と補正

→ **連続運用困難**

F1カー



原子時計の現在の精度 (3年に1秒: 10^{-8})

市販原子時計(Cs); **確度** $\sim 10^{-12}$ 、**安定度** $\sim 10^{-14}$ (数日)

水素メーザー時計: **安定度** $\sim 10^{-15}$

一次周波数標準器: **確度** $\sim 5 \times 10^{-16}$ (10~20日)

国際原子時の発生 (国際度量衡局、約一月遅れ)

世界約70機関、約400台の原子時計 → **高安定** 5×10^{-16} ?

世界約10台の一次周波数標準器 → **高確度** 3×10^{-16}

400台の平均に対する絶対値補正量、この春は 6.483×10^{-13}

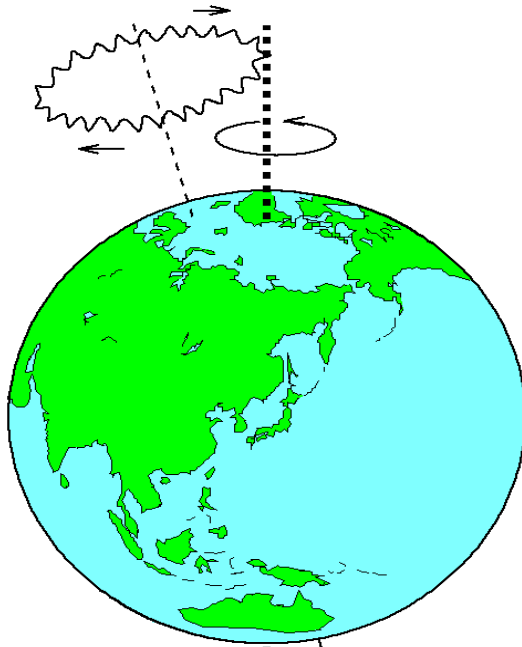
各国の標準時 1千万分の1秒から1億分の1秒程度の差



2つの時系

世界時

(地球の回転による時計)
~1960(1967定義改訂)



地球の動きは
ふらふら(不規則)

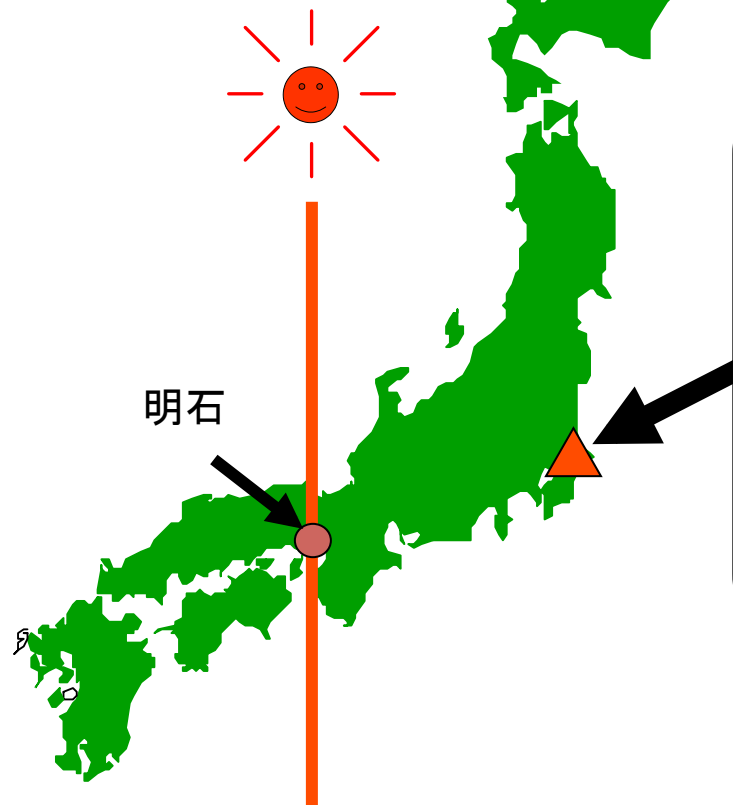
原子時

(Cs133原子の遷移周波数)
1958~(1967定義改訂)



規則正しい時刻・周波数標準
数10万年に1秒

日本の時刻は 明石の天文台で決めている？



明石

東経 135 度の子午線

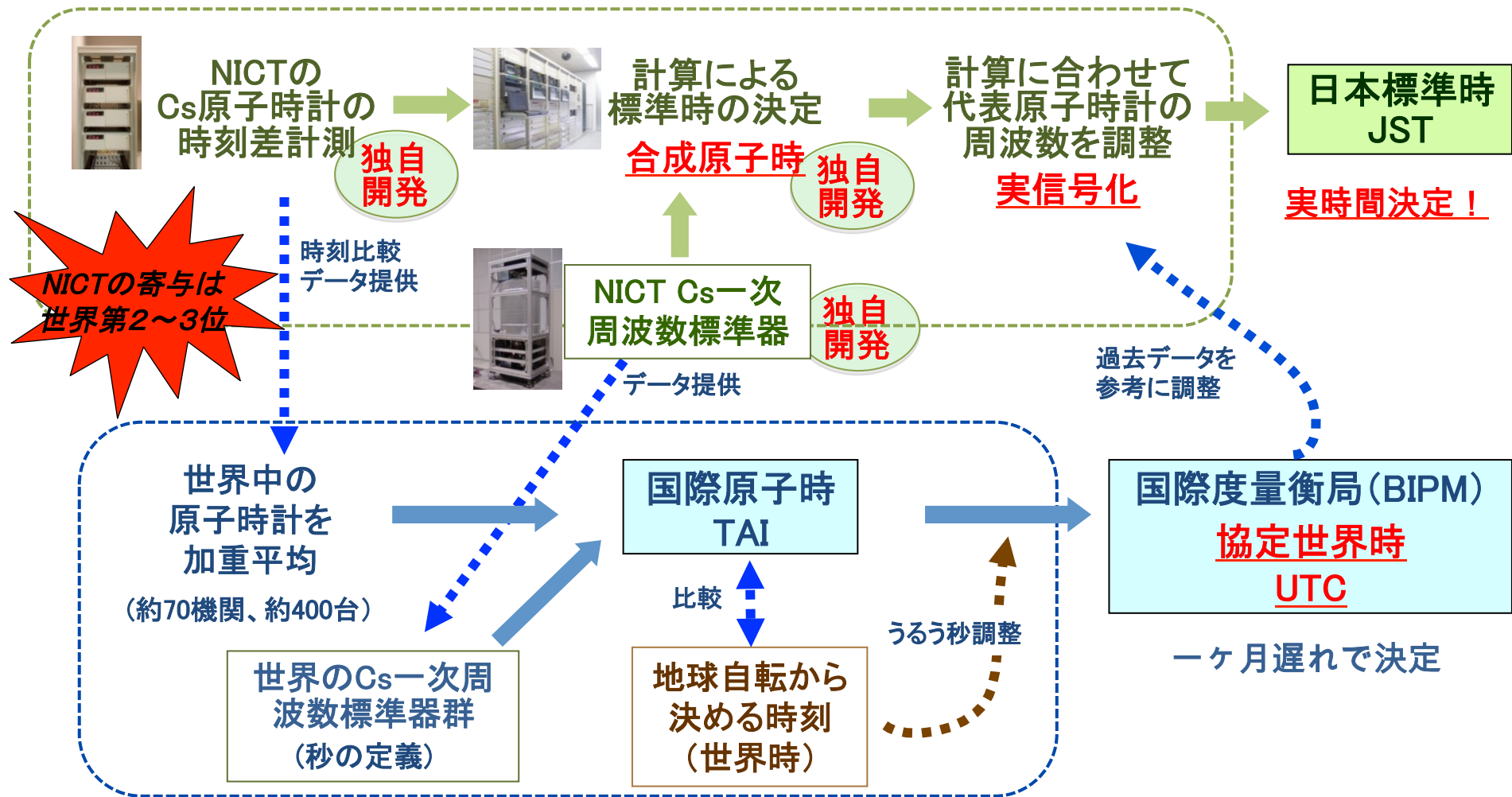
いいえ！

東京にある
情報通信研究機構の
「**原子時計**」が
日本の標準時刻の供給の
もとになっています

世界標準時に対して
9 時間の時差
(1 時間で 15 度) だけ

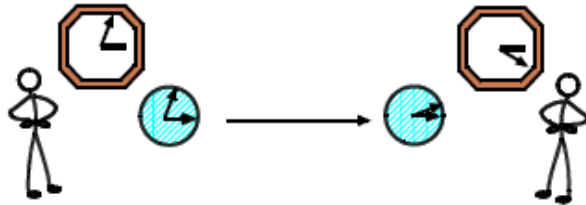
標準時の構築の仕組み

基本は、計測、計算、調整



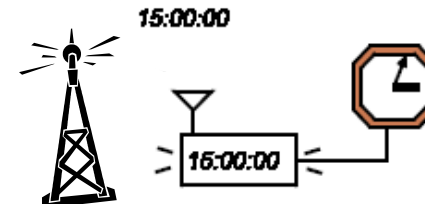
時刻比較のいろいろな方法

(1) 運搬時計法



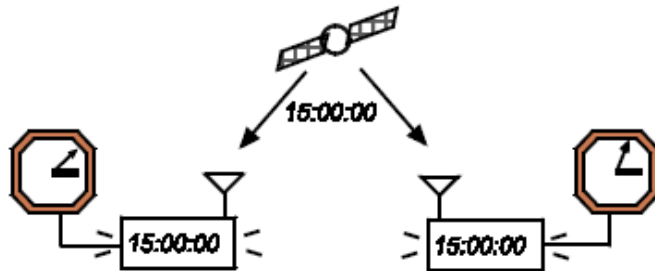
仲介時計を運搬して、離れた二つの時計の時刻差を求めます。移動中の運搬時計のふらつきが誤差

(2) 片方向（One Way）法



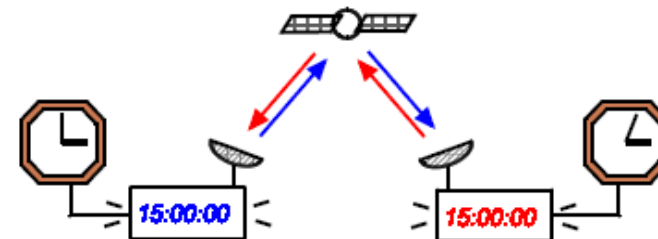
標準電波や時報、GPSからの時刻信号を受信して、自分の時計の時刻を比べる。
手軽だが、信号が届く時間が誤差

(3) 共視（Common View）法



離れた二つの時計の間で、共通の信号を受信し、それを仲介として、二つの時計の時刻差を求める。より高精度だが、地点が離れていると、伝わり方の違いが誤差

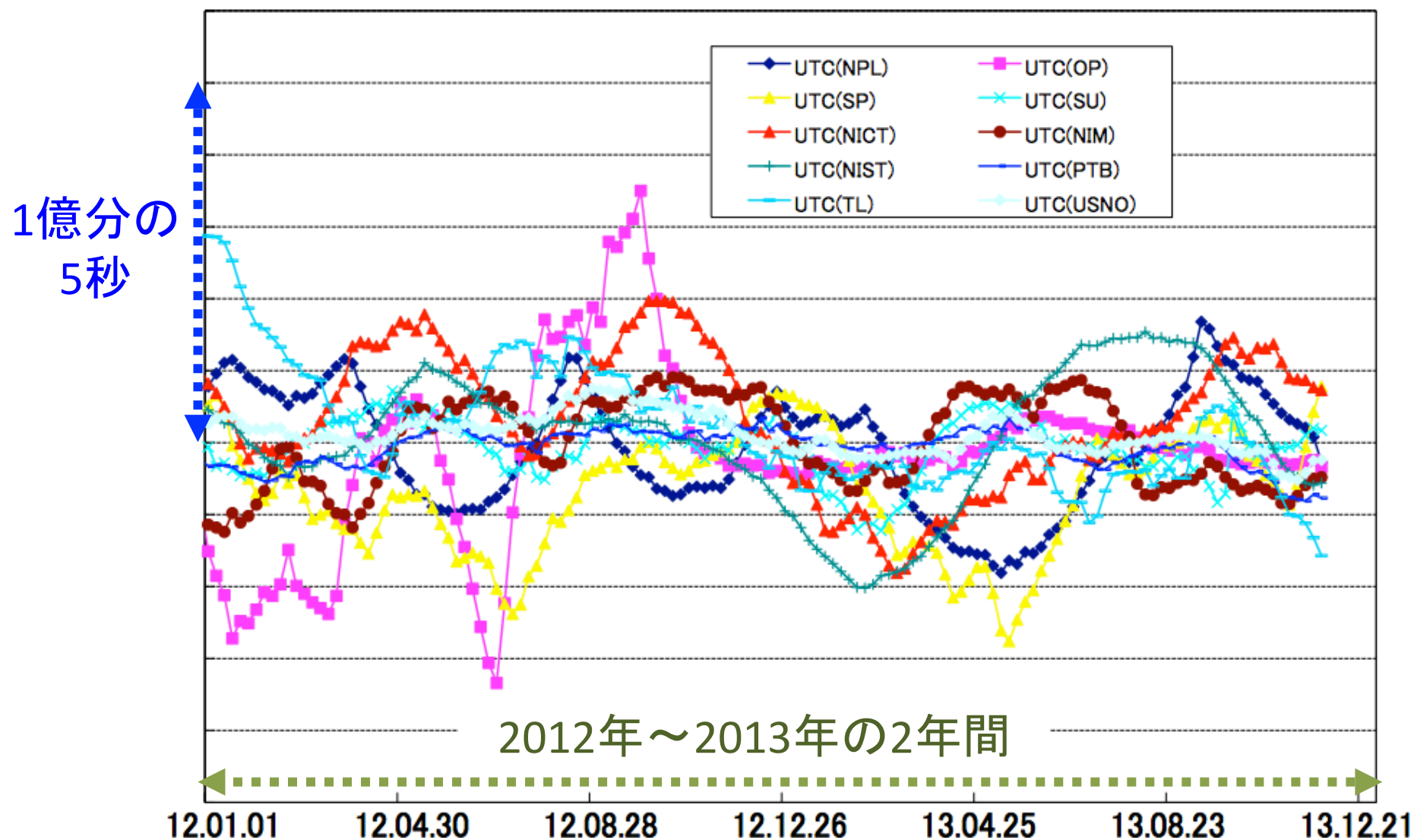
(4) 双方向（Two Way）法



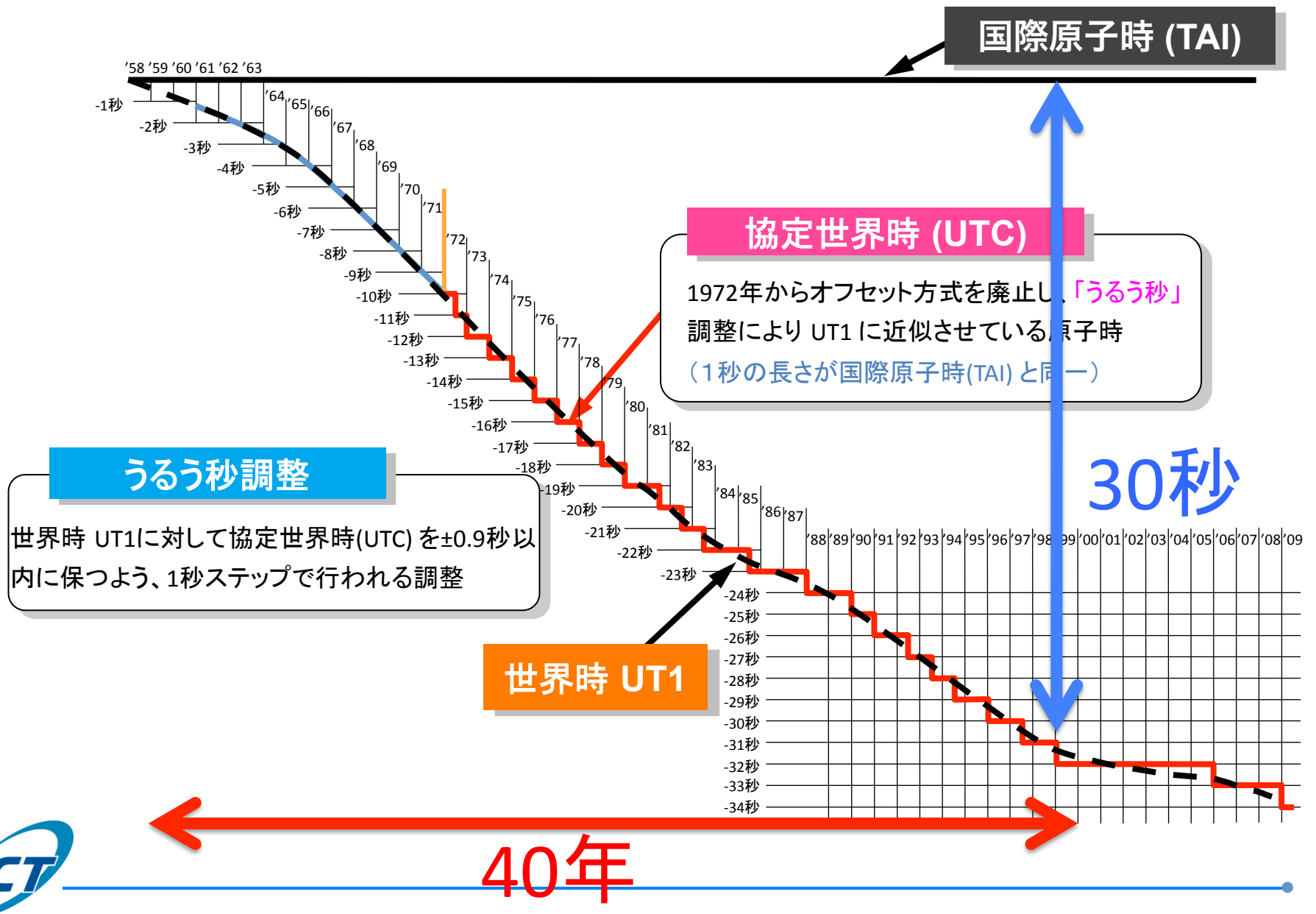
離れた二つの時計の間で、時刻比較用の信号を送信しあい、両局での受信時刻の差から二つの時計の時刻差を求める。

伝搬時の誤差が相殺されるため、高精度な時刻比較が可能。

国際原子時 vs 各国の標準時 (Top10)



原子時と「うるう秒」



2012年7月1日のうるう秒

NICT本部に1500人が..



セシウム時計の最高峰 レーザー冷却原子泉標準器

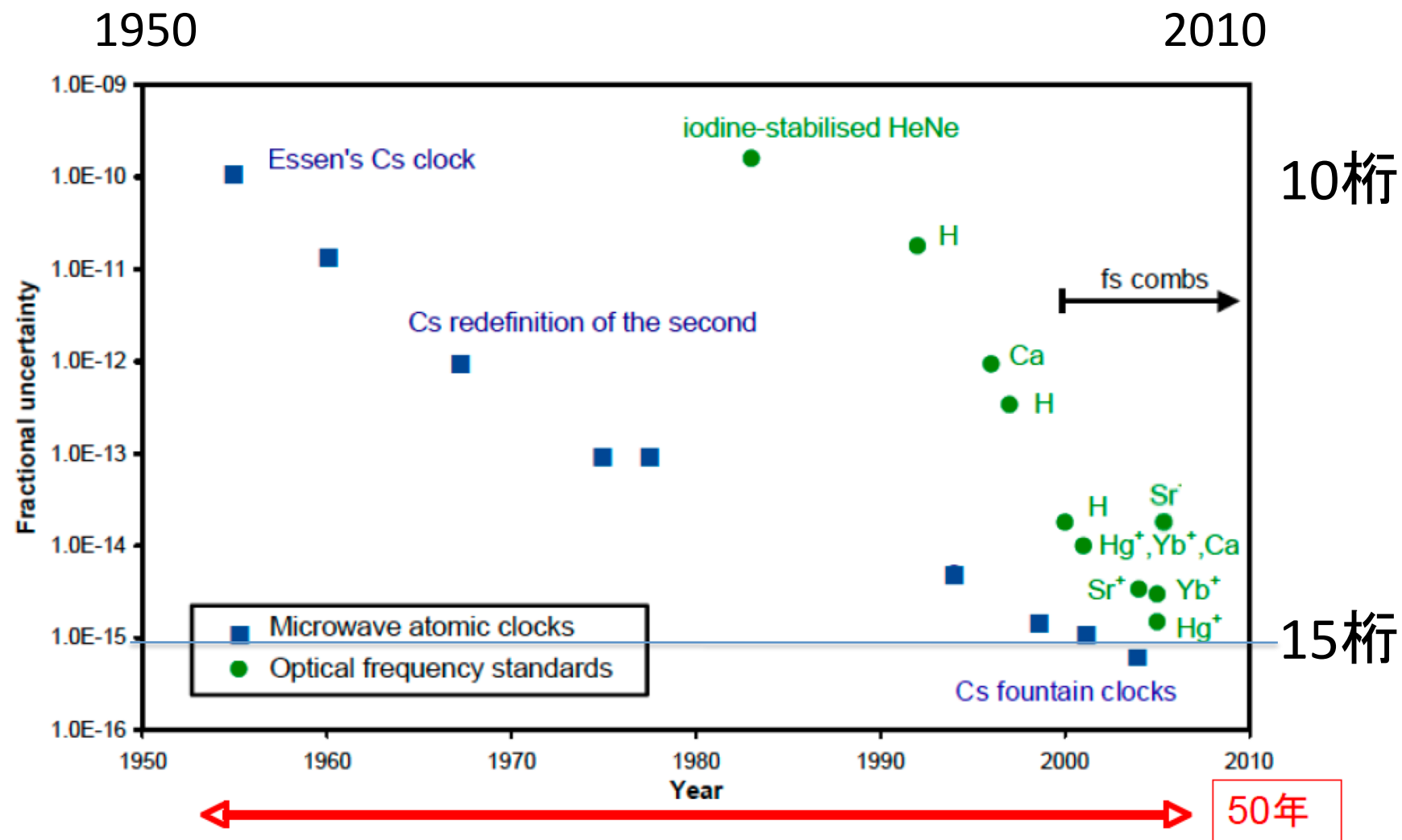
- ・2 μ K (原子速度 1cm/s)まで レーザー冷却
- ・多数(**億レベル**)の原子からの信号
- ・垂直打ち上げ、重力場中を**自由落下**
- ・往きと帰りでマイクロ波照射(間隔0.5秒)
～ 10^{-15} の正確さ

- ・精度の限界はどこから？
地球重力場
多数原子の衝突の影響

→ 光領域でより良い時計遷移？



原子時計の正確さの向上



測地、測位（GPSカーナビ）

超長基線干涉計(VLBI)

1980年代、日本とハワイが毎年6cm接近

GPSカーナビ

数万km彼方の衛星(原子時計)からの信号
差を一億分の1秒レベルで検知し、位置決定

・・・どちらも**13桁以上**の精度があって実現

新しい、光の原子標準の可能性

Dehmelt の指摘(1970年代)

シングレイオンによる光の標準は18桁の可能性

自然幅 ~ 1 Hz(15桁)、中心測定 3桁あれば...

レーザー冷却、レーザー安定化技術等、光技術の急進展
電波と光、周波数チェーンの壁 ...

参考: 原子標準関連のノーベル賞

1989年 Dehmelt, Paul, Ramsey (標準器)

1997年 Chu, Cohen-Tannouji, Phillips (レーザー冷却)

2001年 Wieman, Ketterle, Cornell (冷却原子、B-E 凝縮)

2005年 Haensch, Hall (光コム)

2012年 Haroche, Wineland (単一量子系の操作や測定)

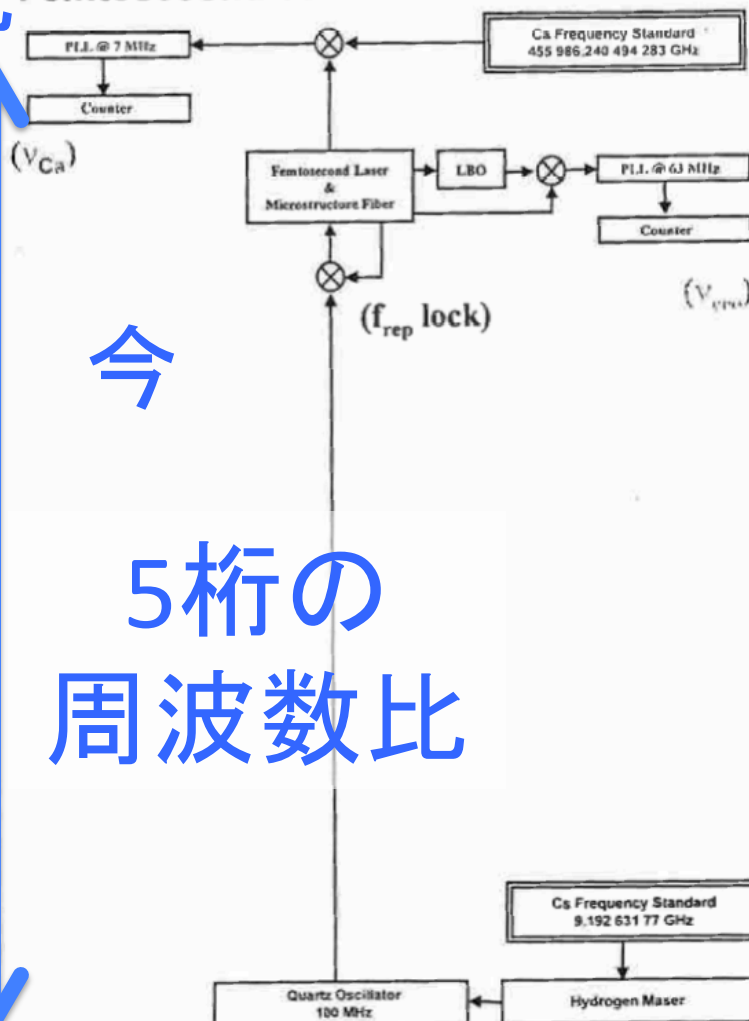
音 光

普



電波

- Femtosecond comb:



マイクロ波と光のリンク fsパルスレーザー光コム ('99~'00)

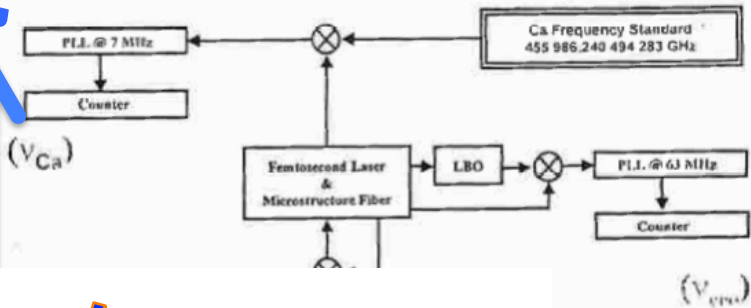
Conventional chain vs. femtosecond comb

Conventional chain:



光
↑
(ν_{Ca})

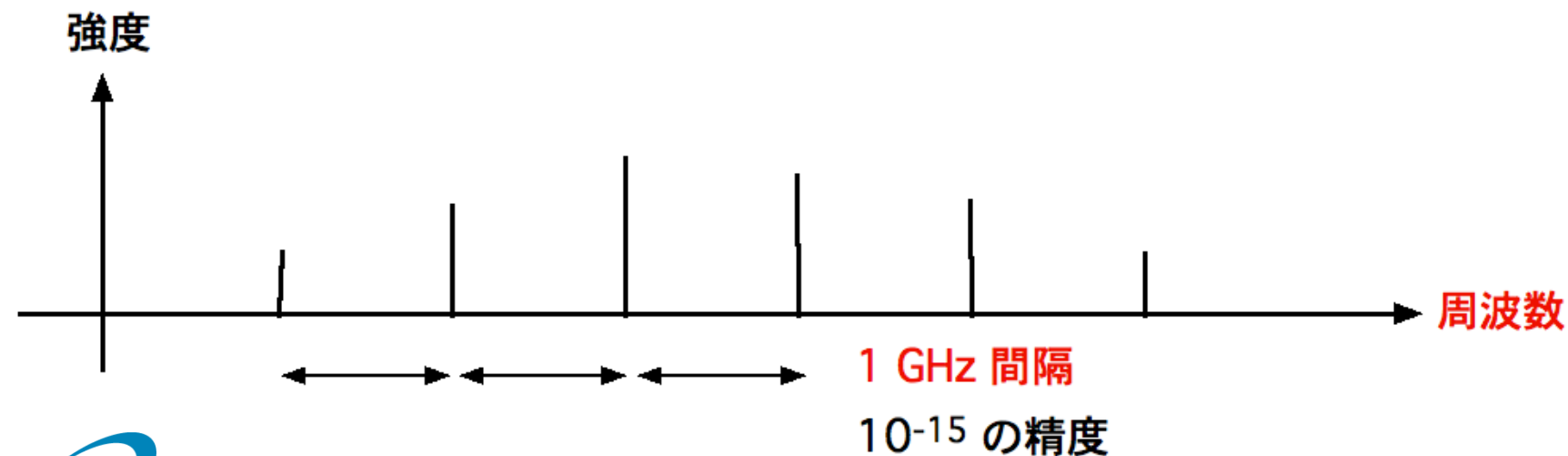
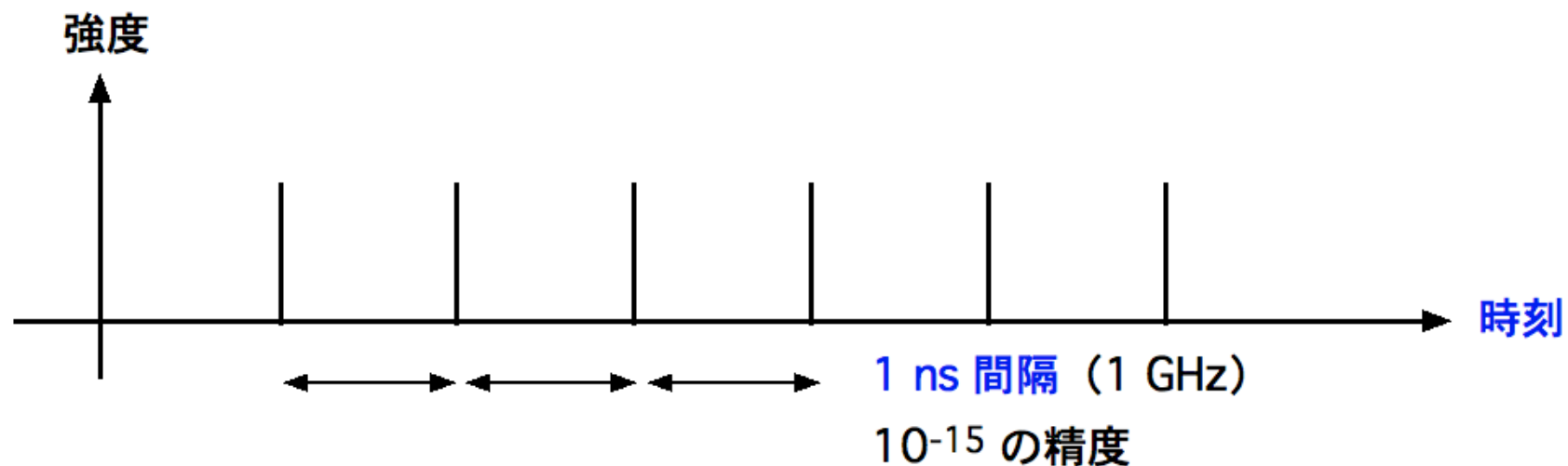
Femtosecond comb:



2005年
開発から5年で
ノーベル賞受賞

↓
電波

超短パルスレーザー 間隔の正確な制御 → 正確な周波数間隔



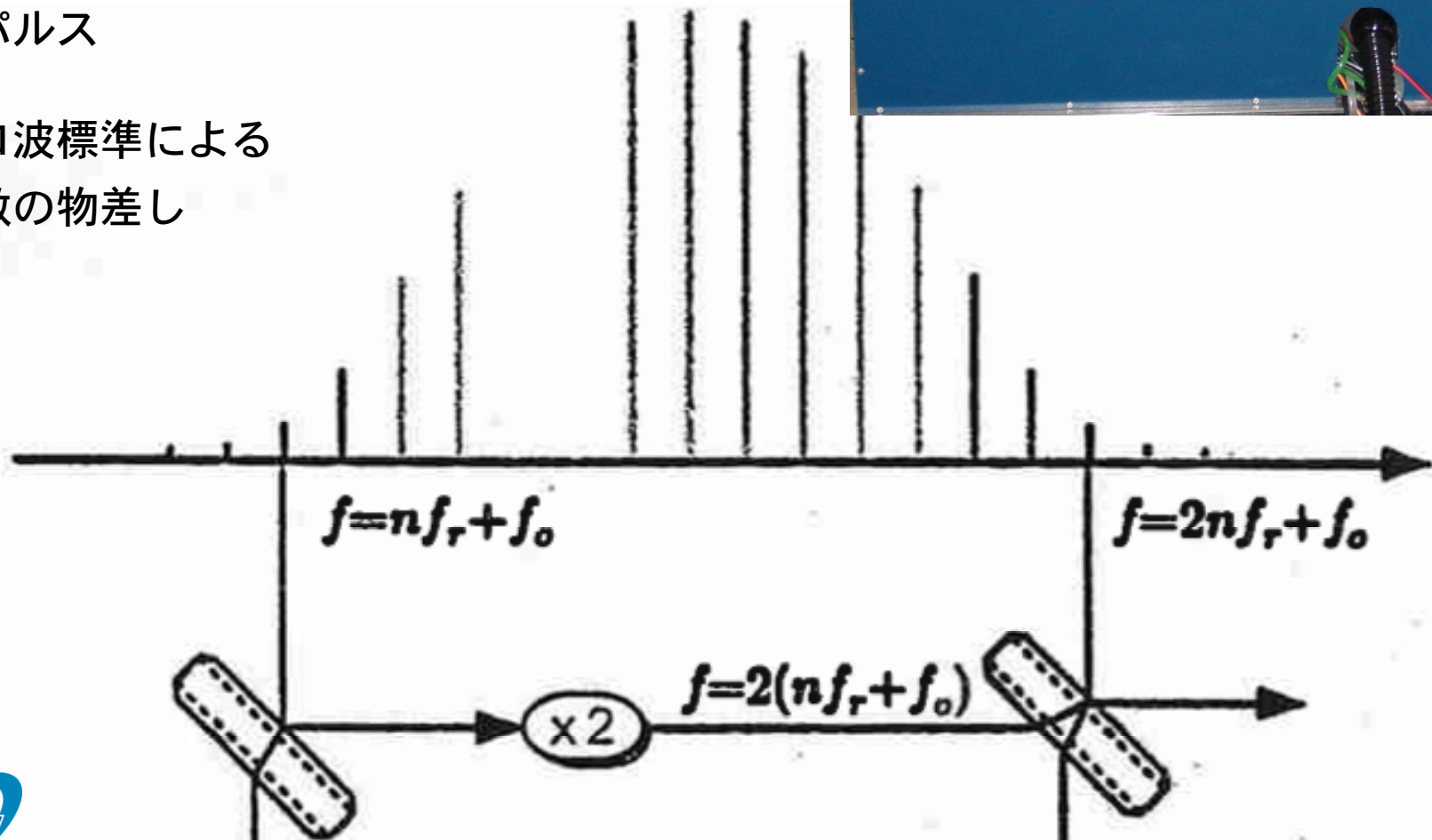
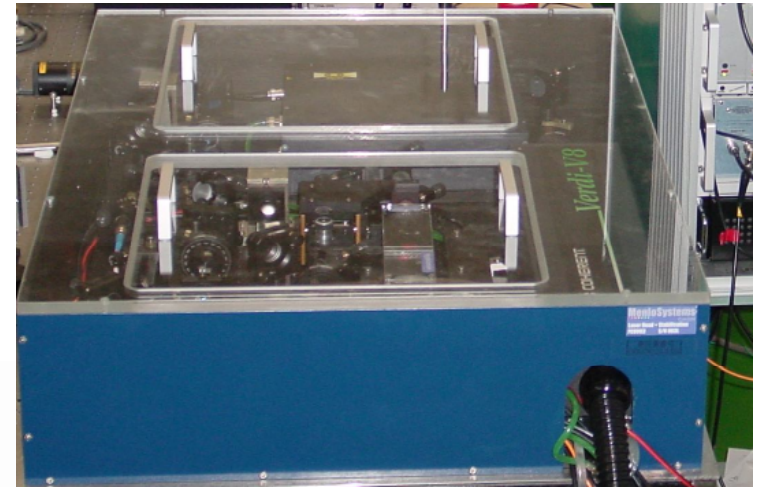
オクターブへの拡大

→ オフセットの計測制御

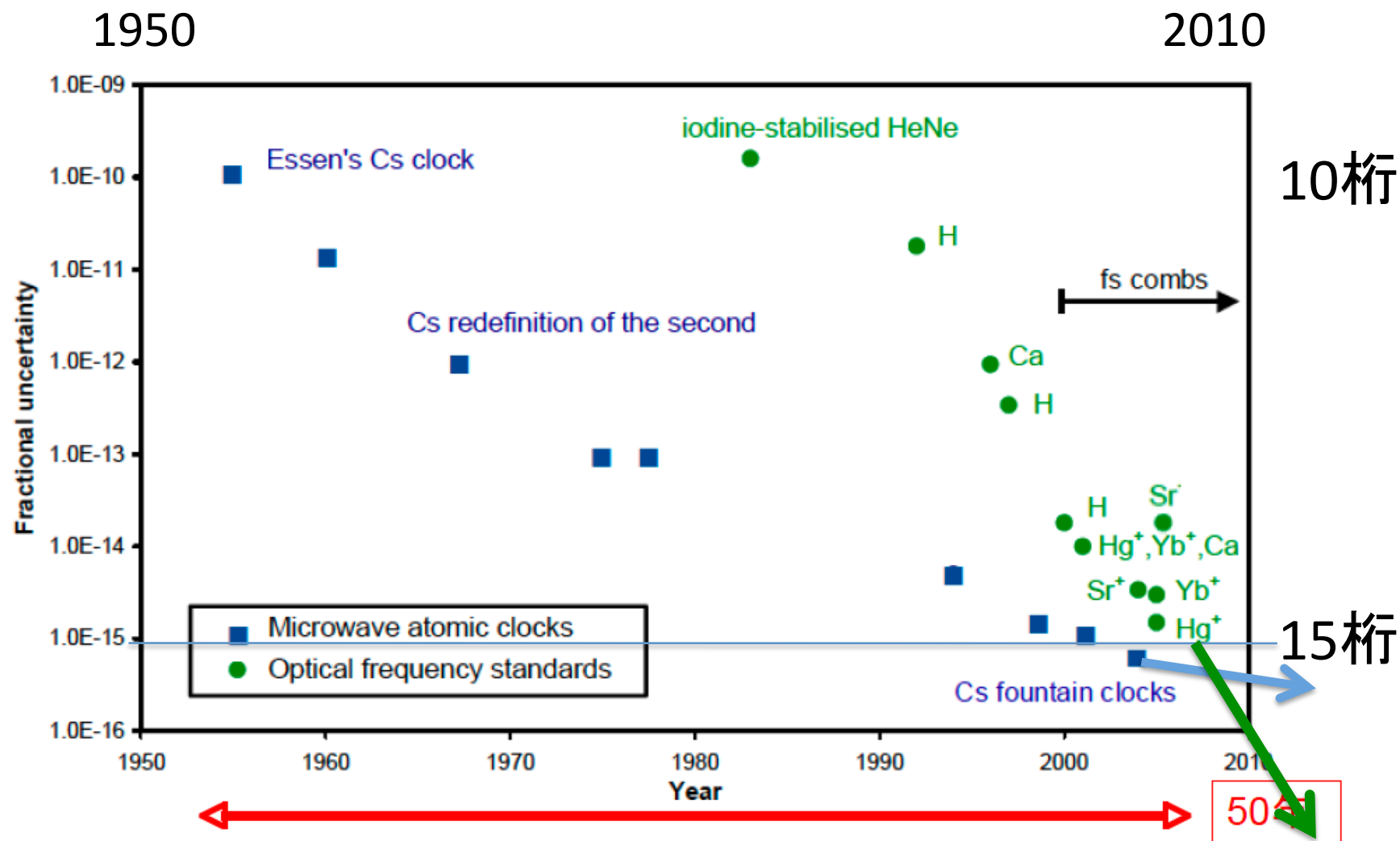
非線形ファイバー

広帯域パルス

マイクロ波標準による
光周波数の物差し



原子時計の正確さの向上



光周波数標準：極限計測技術への挑戦

単位の再定義 多くの標準が基礎定数を基準に
最も正確な単位、秒だけは、それが不可能

光の計測、光コムのパフォーマンス向上

原子の制御と操作

単一イオンの閉じ込め

中性原子を光の定在波へ閉じ込め（光格子）

超高安定レーザーへの挑戦

時刻・周波数比較技術の飛躍的向上

いずれにおいても日本、NICTは世界的な成果！

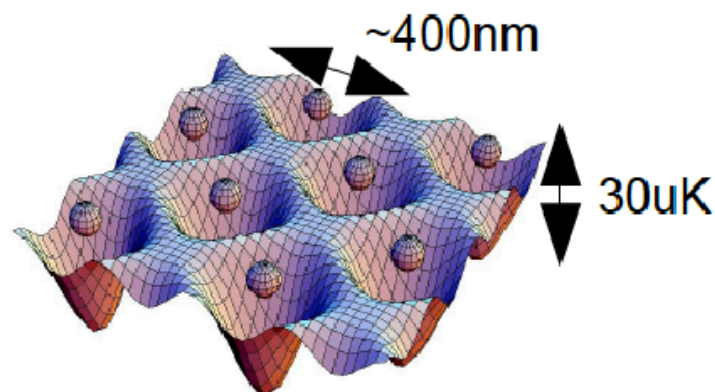


原子の閉じ込め 光格子時計

日本発のアイデア

$10^3 \sim 10^6$ 個の原子

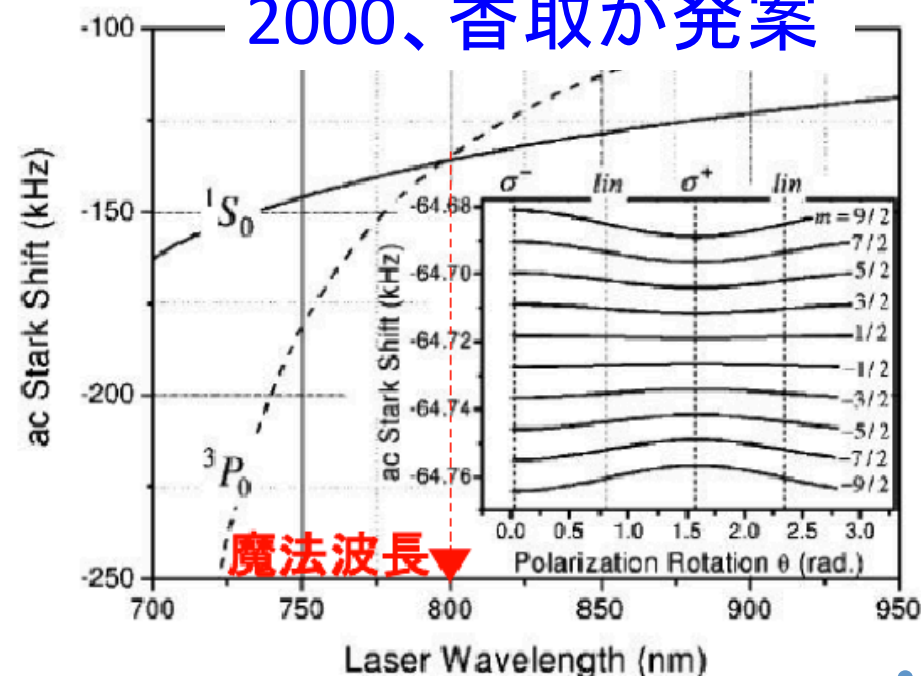
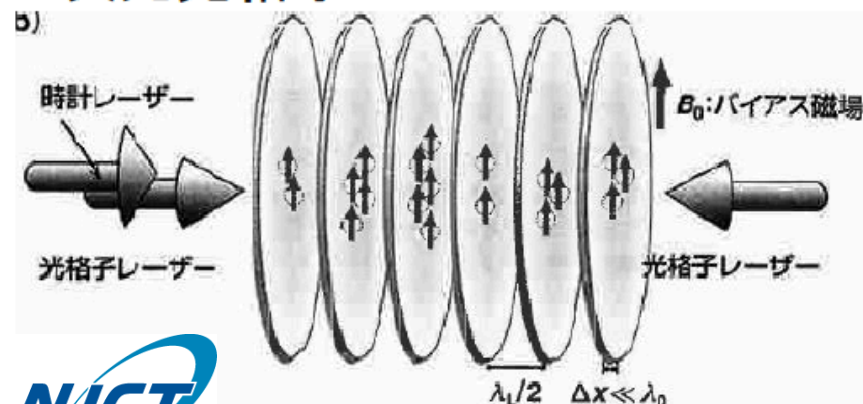
双極子能率を持つ原子を
光の定在波に閉じ込める



強烈なシュタルクシフト
→ 魔法波長の定在波

2000、香取が発案

1次元光格子



光共振器：超高安定性の源

超低膨張ガラス：線膨張係数 10^{-11} のレベル、mKの温度制御

高いフィネス（数十万、Q値換算で 10^{10} 以上）← 高反射率

アメリカの独占（コーニングULE, 蒸着と作成ATF社）

これを用いて、NICTでも2Hz以下を達成

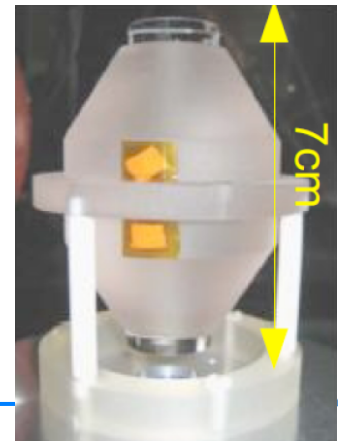
振動と熱雑音

数年前までは振動対策が重要、短い共振器（5～10cm）

16桁の安定度のために → 熱雑音対策が重要

熱には、長い共振器が有利

NICT 共振器の国産化+30cmへの挑戦



極限精度の周波数標準は何の役に？

科学の最先端を切り拓くために

ニュートリノは光より速い？

一億分の6秒、時空計測研究室に検証の依頼

重力波天文学

干渉計：25桁の精度が必要、光自身はせめて15桁・・・

基礎定数は本当に定数か、など

科学の基礎に潜む、様々な謎？？？

例えば、相対論効果は、応用の宝庫

相対論効果の検出

速度効果 $\sim v^2/2c^2$ 人工衛星 $v \sim 3 \text{ km/s} \rightarrow 5 \times 10^{-11}$

$C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ジェット機 $v \sim 300 \text{ m/s} \rightarrow 5 \times 10^{-13}$

自動車 $v \sim 30 \text{ m/s} \rightarrow 5 \times 10^{-15}$

現代では、自動車による相対論効果も測れそうな段階

素粒子、原子核 ほぼ光速、確認済み

人工衛星（GPS）、ジェット機 確認済み

原子時計の原子：速度約 250 m/s 、 10^{-13} のレベルで補正が必要

重力赤方偏移 $\sim r_g / 2r$: シュバルツシルト半径 $r_g = 2GM/c^2$

地球 $6 \times 10^{24} \text{ kg} \rightarrow r_g = 9 \text{ mm}$, 地球半径 $r \sim 6400 \text{ km}$

実際に測定できるのは、絶対値ではなく、差

高さ（中心からの距離）が1m 違ったら？

$$\frac{1}{2} \frac{9 \text{ mm}}{6400 \text{ km}} - \frac{1}{2} \frac{9 \text{ mm}}{6400 \text{ km} + 1 \text{ m}} = 1.1 \times 10^{-16}$$

地表近くでは、高度1mにつき時間の進み方が 1.1×10^{-16} 変化する

相対論と精密時空計測関連、自分の研究から

1990(1992) 太陽系、三つの時刻静止軌道

1993 重力レンズ効果と年周視差による星の質量測定

1995 パルサー信号の重力遅延による途中の星の質量測定

1997 重力レンズ効果によるクエーサー基準座標系の揺らぎ

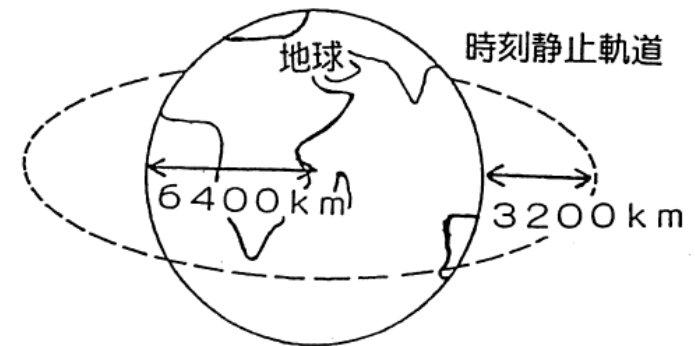
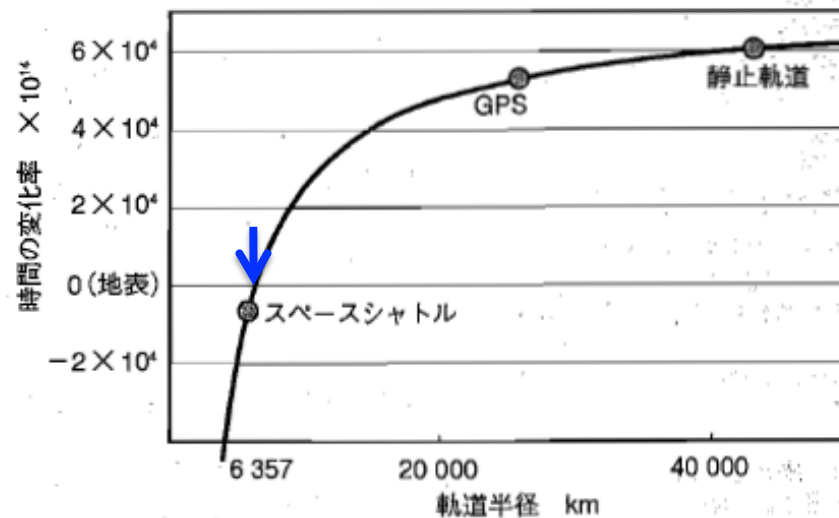
1999 重力遅延効果によるパルサー時系の揺らぎ

2002 重力レンズ効果による銀河の距離測定の揺らぎ

2000年以降は原子時計開発、標準技術全般のリーダー役

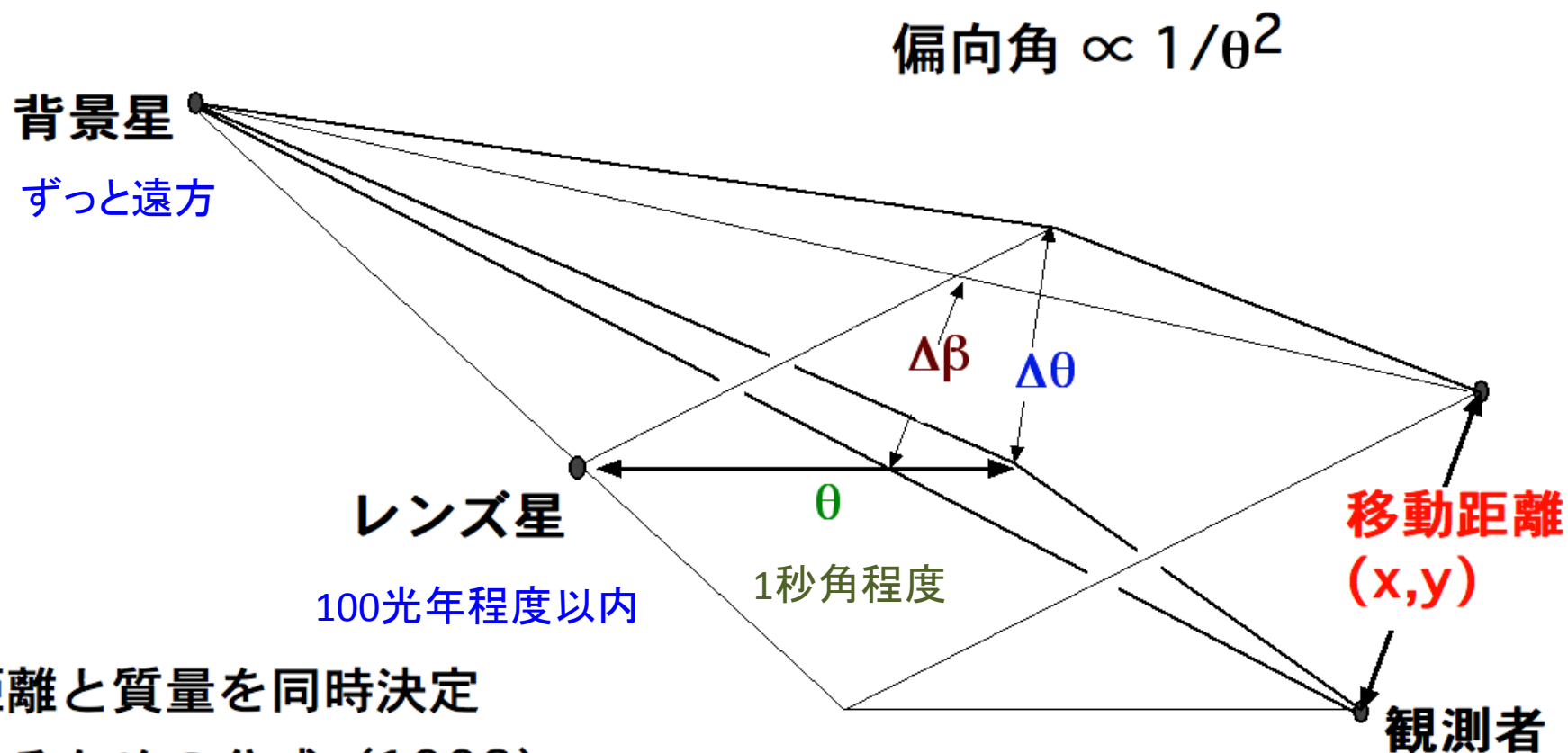
太陽系、三つの時刻静止軌道

速度と重力の合計は？



地球公転軌道の少し内側(さらに内側には解無し)、
木星の衛星軌道にも(火星、土星などは軽すぎ)

質量測定の方法



10マイクロ秒角の観測精度

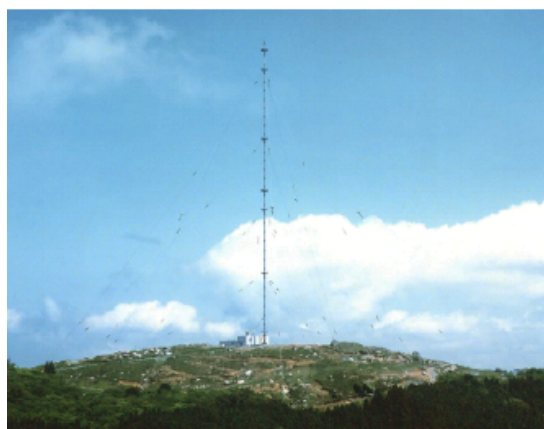
$$D = \frac{1}{2} \left[\frac{x}{\Delta\theta_x} + \frac{y}{\Delta\theta_y} \right], \quad M = \frac{c^2 \theta^2}{8G} \left[\frac{x}{\Delta\theta_x} - \frac{y}{\Delta\theta_y} \right]$$



福島登志夫氏らと共著、Astronomy & Astrophysics Letter, 1993

長波帯標準電波送信所（電波時計の信号）

はがね山
標準電波送信所
標高933m



おおたかどや山
標準電波送信所
標高825m



情報通信研究機構
(小金井)
標高119m

1 m につき
 1.1×10^{-16}



10^{-14} 程度の
計測精度が必要！

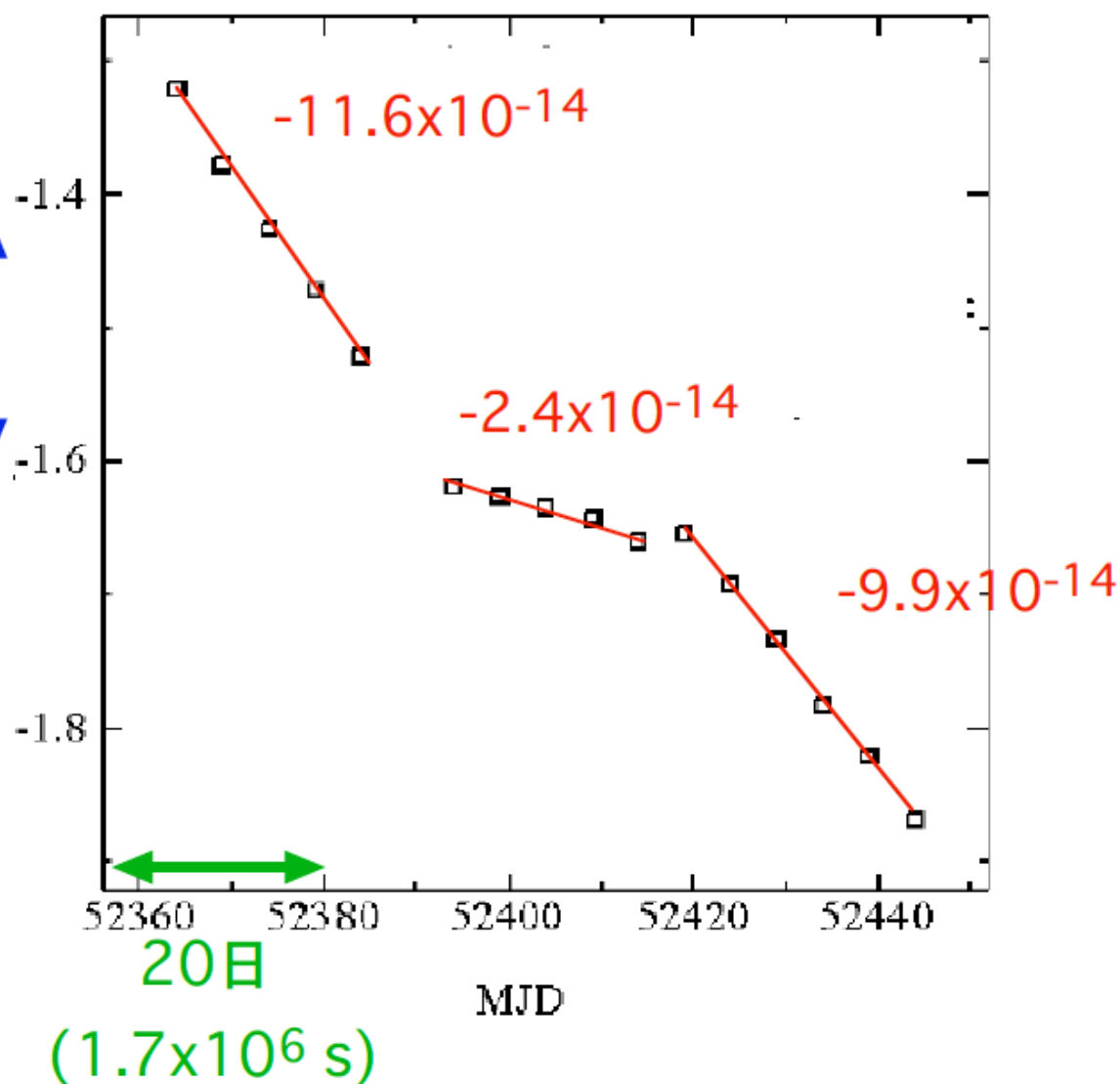
おおたかどや山への
原子時計輸送

$0.2 \mu\text{s}$
($2 \times 10^{-7} \text{ s}$)

周波数変化

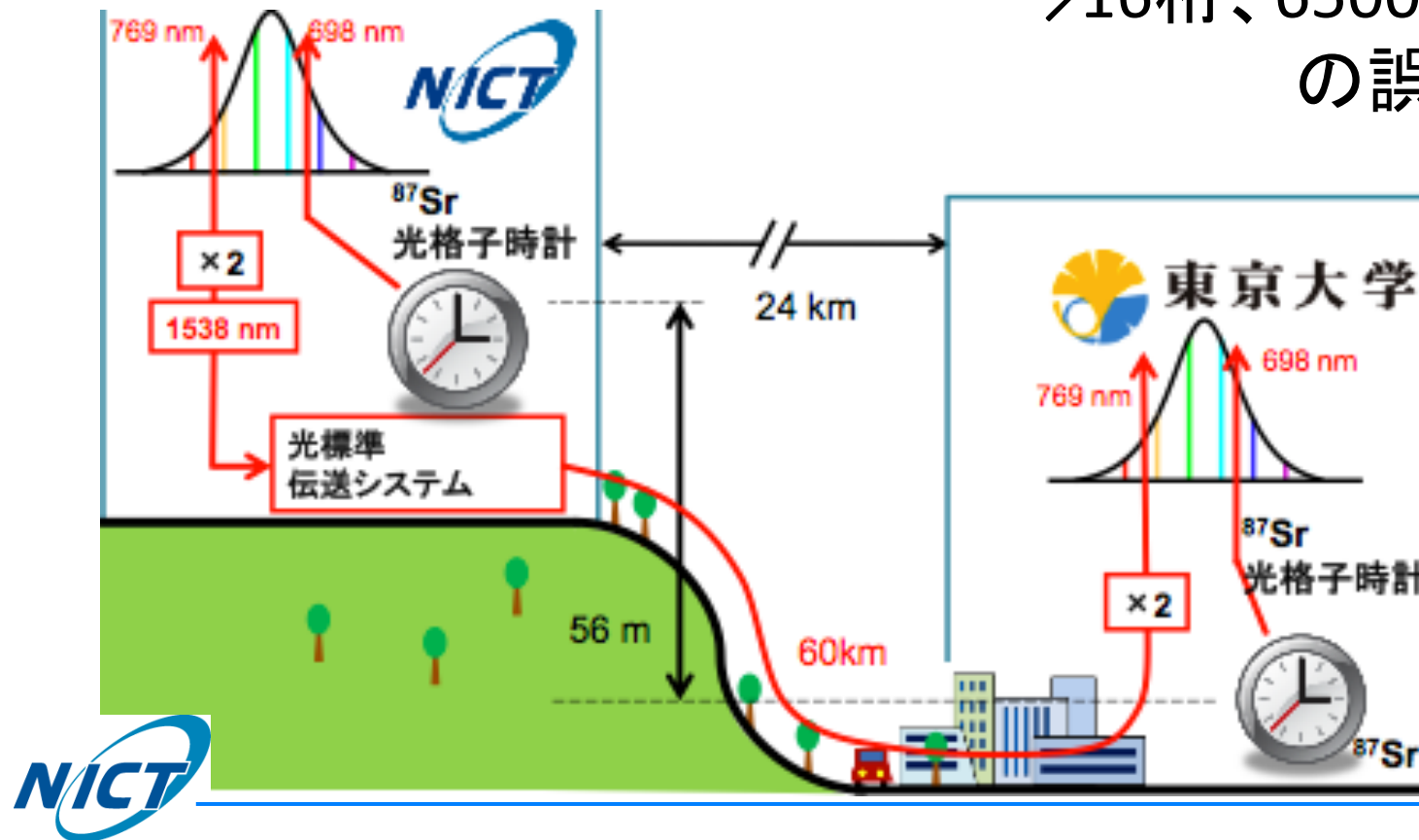
理論値 7.8×10^{-14}

実測平均 8.5×10^{-14}



相対性理論の検証と応用

2011年、NICTの光格子時計と東大の光格子時計
光ファイバーでつないで周波数比較
56mの高低差の相対論的補正(15桁目)
→16桁、6500万年に1秒
の誤差で一致



まとめ

- 時間とは？ 力学時系と積算時系、SI単位系の変遷
- 暦 時を記述する体系、太陽、月、地球 何に対する周期か？
- 時間の標準と時計開発の歴史
 - ホイヘンス、ハリソン、ショート、ニューカム
- 原子時計とは
 - 原理：共鳴と量子力学 ラムゼー、エッセン・・・
 - 精度：1兆分の1秒以上、時間のずれ15桁以上
- 標準時の作り方
 - 計測、平均、計算、調整：各国がつくり、世界で協力と競争
- 光周波数標準の劇的な発展
 - 光コム、光格子時計、超高安定レーザー・・・
- 最高の計測精度の役立て方
 - カーナビ、光通信、量子論、相対論、重力波天文・・・ 新たな科学の眼