

# 光周波数標準の現状と将来展望

情報通信研究機構 (NICT)

長野 重夫

# 標準時の中における1次周波数標準器

来年の1月1日、1日の時間が1秒だけ長くなる「うるう秒」がある。日本でこの調整をするのが日本標準時を決めている小金井市の独立行政法人、情報通信研究機構(NICT)。当日は建物正面のデジタル時計で、うるう秒の瞬間が確認できる。

かつて時間は、地球の自転を基準にしていた。それが1967年、原子の出す規則正しい電磁波を利用した原子時計を基準に1秒の長さをとらえるよう、国際的に取り決められた。

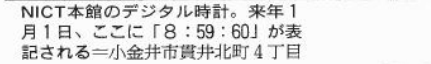
厳密に調べると、地球の自転には不規則な、やがやがやという動きがある。このため1回転するのにかかる時間が1日あたり、およそ1000ナノ秒で、都教育委員会は2日、阪神の交差点に時計の設置

## 09年元日は1秒長い うるう秒 小金井から送信

来年の1月1日、1日の時間が1秒だけ長くなる「うるう秒」がある。日本でこの調整をするのが日本標準時を決めている小金井市の独立行政法人、情報通信研究機構(NICT)。当日は建物正面のデジタル時計で、うるう秒の瞬間が確認できる。

かつて時間は、地球の自転を基準にしていた。それが1967年、原子の出す規則正しい電磁波を利用した原子時計を基準に1秒の長さをとらえるよう、国際的に取り決められた。

厳密に調べると、地球の自転には不規則な、やがやがやという動きがある。このため1回転するのにかかる時間が1日あたり、およそ1000ナノ秒で、都教育委員会は2日、阪神の交差点に時計の設置



NICT本館のデジタル時計。来年1月1日、ここに「8:59:60」が表示される—小金井市貫井北町4丁目

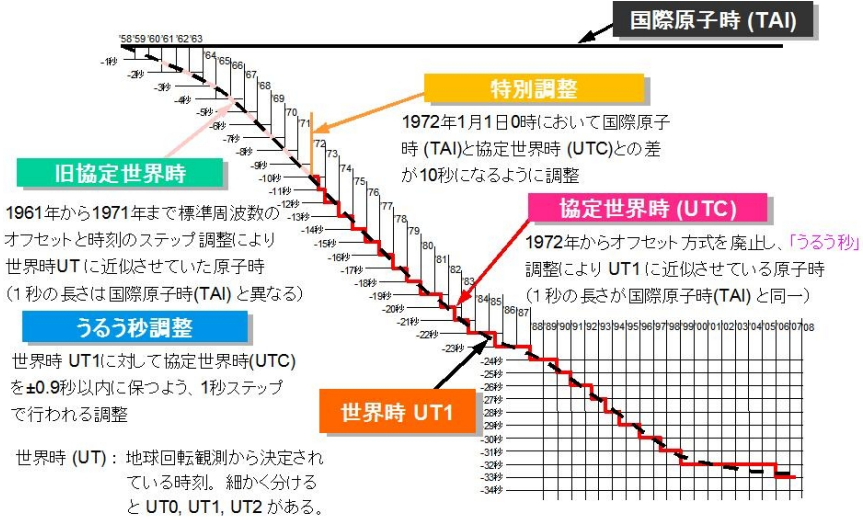
6日の上映会「SANANAフィルムフェスタ」は午後6時40分から、立川市女性総合センター「アイム」(曙町2丁目)で。参加費は800円(学生500円)。問い合わせは事務局の有賀精一さん(070-6666-7094)へ。(須藤龍也)

今回は3年ぶり24回目になる。NICTにはセシウム原子時計が18台あり、その平均値を世界標準時と合わせ、日本標準時を決めている。この情報は電話回線や電波を通じて、放送局やNICTの時報、電波時計などに送られ、活用されている。

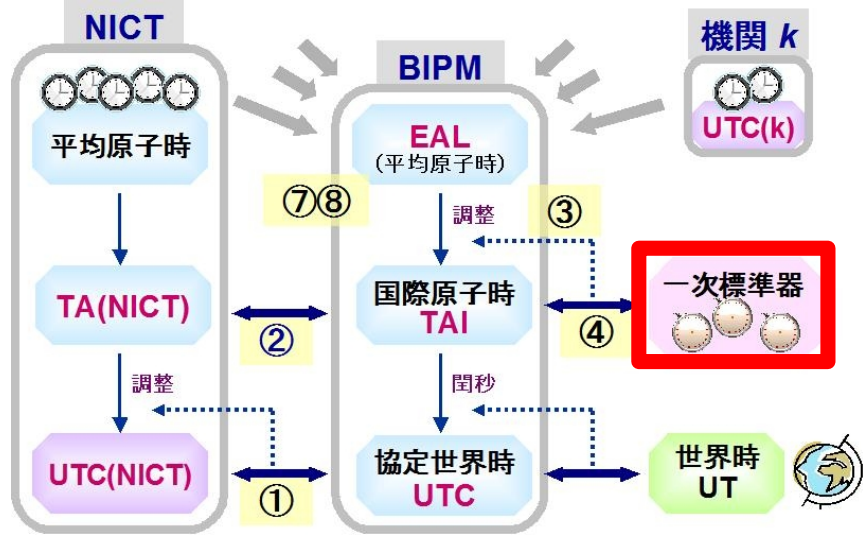
今回のうるう秒は「協定世界時」で09年1月1日になった瞬間に挿入される。これは英国を基準としているため、日本とは9時間の時差がある。NICTは09年1月1日の「午前8時59分59秒」と「午前9時00分00秒」の間に「午前8時59分59秒」という時間を入れる。

うるう秒の瞬間はNICT正面のデジタル時計のほか、ホームページ(http://www3.nict.go.jp/cgi-bin/jst.pl)でも確認可能。時計のほか、携帯電話のロビーモニター、テレビ、DVDなどの家電製品など、あらゆるものに時刻表がつけられている。時間を感じた人は調整が気にならぬように、NICTの担当者は普通の生活をしている人から、そう慌てて調整の必要はないでしょう。元日(すし)は話して。(小林伸行)

朝日新聞 12月3日より



## 協定世界時(Coordinate Universal Time: UTC)の発生



今回は、将来の1次標準器である光周波数標準の開発の現状、将来展望について述べる。



# Outline

---

- ・ イントロダクション  
原子時計と1次周波数標準器、その歴史
- ・ 時間・周波数標準の基本的尺度  
周波数確度と周波数安定度、アラン分散とパワースペクトル密度
- ・ マイクロ波標準  
セシウム一次周波数標準器、原子物理の簡単な復習、レーザー冷却
- ・ 光周波数標準  
原理、イオントラップと光格子時計、クロックレーザー、フェムト秒光周波数コム
- ・ 光周波数標準の現状  
日本の状況(特にNICTの研究について紹介)、世界の状況
- ・ 光周波数標準の将来展望と応用  
将来展望、 $^{229}\text{Th}$ 全固体光時計、物理定数の時間変化、分子時計、光周波数コムの発展
- ・ まとめ

# イントロダクション

# 原子時計と1次周波数標準器、その歴史

---

## 現在の秒の定義

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9 192 631 770 倍の継続時間である

[http://www.bipm.org/en/si/si\\_brochure/chapter2/2-1/second.html](http://www.bipm.org/en/si/si_brochure/chapter2/2-1/second.html)

## 秒の歴史

1799 仏のメートル法で、1秒を地球の自転に基づく1日の86400分の1と定義

1949 ラムゼー共鳴法の開発(Ramsey(米))

1955 最初のセシウム原子時計開発(Essen(英))

1967  $^{133}\text{Cs}$ による秒の再定義(国際度量衡委員会(CIPM))

1975 原子・イオンのレーザー冷却の提案

1978 トラップされたイオンのレーザー冷却の実現とイオントラップ時計の開発(Dehmelt(米),Paul(独))

1985 中性原子のレーザー冷却(Chu(米)他)

1993 Cs原子泉型1次周波数標準器の開発

1999 フェムト秒光周波数コムによる光周波数計測の実現(Hall(米),Hansch(独))

2001 光時計の実証

2005 光格子時計の開発(香取(日))

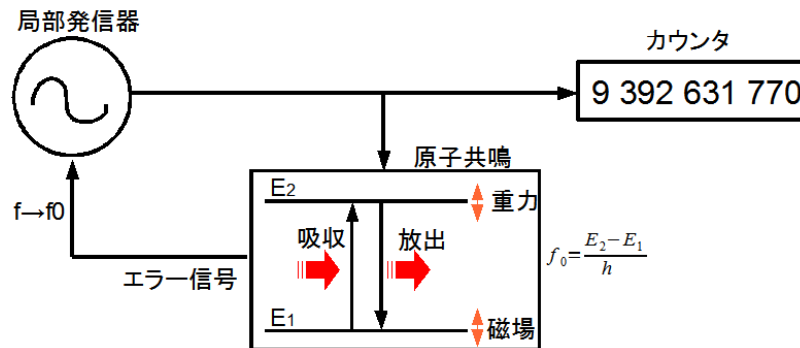
20XX 光時計による秒の再々定義???

それでは、1秒を刻む時計とは何か？

# 原子時計と1次周波数標準器、その歴史

時計とは、一般に 1. 振り子と歯車、2. 水晶発振器、3. 表示機 から構成される

原子時計は、原子のエネルギー準位間の量子遷移を利用→電磁波の**吸収と放出**



$^{133}\text{Cs}$  : 原子番号55、質量数133

→ (奇数核 + 54個の閉殻電子) + (電子1個)

平行⇄反平行に移り変わる際(超微細構造間遷移)に、

エネルギー差に応じた電磁波が放出・吸収される

その電磁波が**9 192 631 770**回振動するのに要する時間を1秒と定義

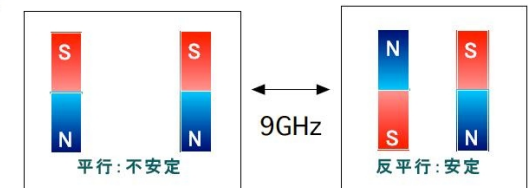
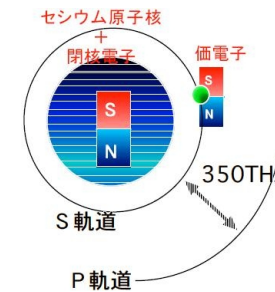
定義上の測定条件：海拔0m地点、真空中、絶対零度、電磁場なし、静止したCs

・原子時計 (Atomic Clock)

測定条件の違いによるずれ(周波数シフト)を考えない。連続運用と**安定性**を重視。

・1次周波数標準器 (Primary Frequency Standard)

実際の測定条件(ex. 海拔85m、ほぼ真空、摂氏37度、磁場あり、速度~200m/s etc)による周波数シフトを全て考慮し、自力で正しい周波数を決定。**正確さを重視**。連続運用には不向き。



# 時間・周波数標準の基本的尺度

# 周波数確度と周波数安定度

\* 1次周波数標準器の確度： $\frac{\delta \nu}{\nu_0}$

$\nu_0$ : 原子の共鳴周波数

$\delta \nu$ : 中心周波数の不確かさ [統計誤差 (TypeA) や系統誤差 (TypeB, ex. ドップラーシフト、重力シフト etc)]

**確度(accuracy)**とは、計測結果が定義値とどの程度一致しているかを表す尺度。計測結果の信頼性を示す尺度である**不確かさ(uncertainty)**を評価することが周波数標準器の確度を評価することである。

ただし、評価すべき誤差項目として抜けているものもありえるから、確度は厳密には一つの可能性を示すものである。

\* 安定度： $\sigma_y(\tau) = \frac{\Delta \nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N\tau}}$

$\sigma_y(\tau)$ : アラン標準偏差

$\Delta \nu$ : 吸収信号の線幅

$N$ : 単位時間あたりに観測する原子数

$\tau$ : 測定時間

**周波数安定度(frequency instability)**とは、周波数標準器の出力周波数がある一定時間内でどの程度一定化を示している。

時間・周波数標準における安定度評価には、スペクトル(周波数領域)よりもアラン分散(時間領域)が多用される。

・アラン分散の定義

$$\sigma_y^2(\tau) = \langle (y_{i+1}^- - \bar{y}_i)^2 / 2 \rangle = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (y_{i+1}^- - \bar{y}_i)^2 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{x(t_i + 2\tau) - x(t_i + \tau)}{\tau} - \frac{x(t_i + \tau) - x(t_i)}{\tau} \right]^2$$

D.W. Allan,  
Proc. IEEE v54, p221 (1966).

$\bar{y}_k$  は周波数の平均値で、周波数瞬時値  $y_k$  の積分、または二時刻での位相  $x(t_k)$  で与えられる：

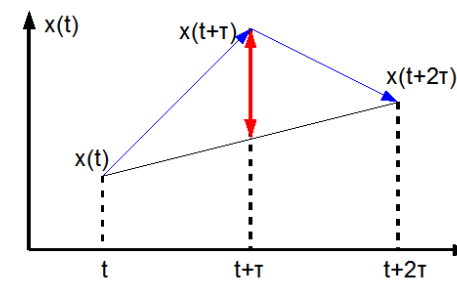
$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = [x(t_k + \tau) - x(t_k)] / \tau$$

意味：ある区間の平均周波数と、次の区間の平均周波数の差の二乗を、

全ての隣接する区間について平均する

解釈：区間(間隔 $\tau$ )平均の周波数が次の区間(間隔 $\tau$ )では、どの程度変わるか、

ということに対する標準偏差





# アラン分散とパワースペクトル密度

アラン分散 $\sigma_y(\tau)$ の利点

1. 時間的な変動を追いかけていける (全測定終了時に得られる全区間での平均周波数が不要)
2. 長期的な周波数ドリフトがあっても、無限時間で値が発散しない (cf. 古典的分散:  $s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{y}_k)^2$ )
3. 現実に入手しうる測定器を用いた場合、スペクトルよりも測定精度が高い

欠点

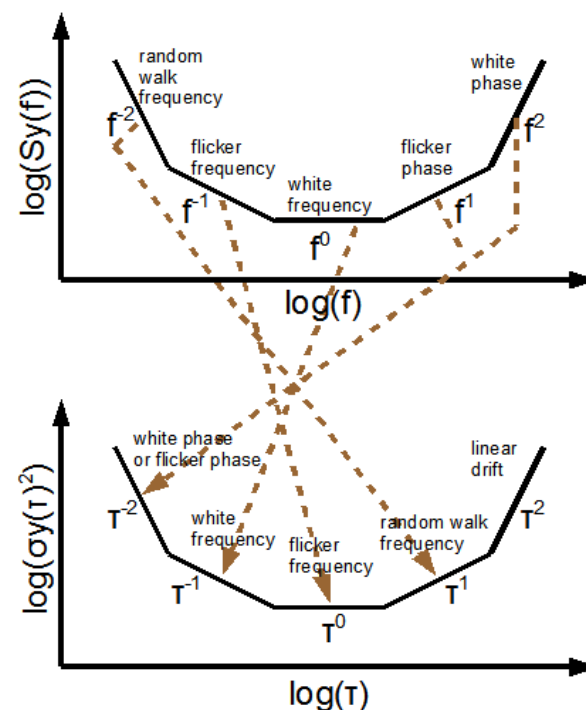
1. 白色PM雑音とフリッカPM雑音はいずれも $\tau^2$ の形を持ち、両者を区別できないのが欠点→修正アラン分散
2. 発振器のノイズハンティングに向かない (周波数 $f_m$ の変動は、アラン分散では平均時間 $\tau=1/(2*f_m)$ とその整数倍のみにピーク)

重力波検出器開発でよく使用される周波数ノイズ"パワー"スペクトル密度  $S_y(f) \equiv \left(\frac{\delta \nu}{\nu_0}\right)^2 [1/Hz]$  とは以下の関係式で結ばれる:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{\infty} S_y(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

表1 周波数安定度尺度の関係 ( $f_h$ は測定帯域幅)

	$\sigma_y^2(\tau) [N=2, T=\tau]$	$\langle \sigma_y^2(N, \tau, \tau) \rangle$
$f^0$ PM 雑音 $S_y(f) = h_2 f^2 \quad 2\pi f_h \tau \gg 1$	$h_2 \frac{3f_h}{(2\pi\tau)^2}$	$h_2 \frac{N+1}{N(2\pi)^2} \frac{2f_h}{\tau^2}$
$f^{-1}$ PM 雑音 $S_y(f) = h_1 f \quad 2\pi f_h \tau \gg 1 \quad 2\pi f_h T \gg 1$	$h_1 \frac{1}{(2\pi\tau)^2} \{3[2 + \ln(2\pi f_h \tau)] - \ln 2\}$	$h_1 \frac{2(N+1)}{N(2\pi\tau)^2} \left[2 + \ln(2\pi f_h \tau) - \frac{\ln N}{N^2 - 1}\right]$
$f^0$ FM 雑音 ショットノイズ $S_y(f) = h_0$	$h_0 \frac{1}{2} \tau^{-1}$	$h_0 \frac{1}{2} \tau^{-1}$
$f^{-1}$ FM 雑音 熱雑音 $S_y(f) = h_{-1} f^{-1}$	$h_{-1} \cdot 2 \ln 2$	$h_{-1} \frac{N \ln N}{N-1}$
$f^{-2}$ FM 雑音 $S_y(f) = h_{-2} f^{-2}$	$h_{-2} \frac{(2\pi)^2 \tau}{6}$	$h_{-2} \frac{(2\pi)^2 \tau}{12} N$



ちなみにレーザー線幅 $\nu$ と周波数ノイズスペクトルとは以下の関係式で結ばれている:

$$I(\nu) = 4 \int_0^{\infty} \cos(2\pi \nu \tau) \exp(-2\pi^2 \tau^2 \sigma^2(\tau)) d\tau, \quad \text{ここで、} \quad \sigma^2(\tau) \equiv \int_0^{\infty} \nu_0^2 S_y(f) \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df$$

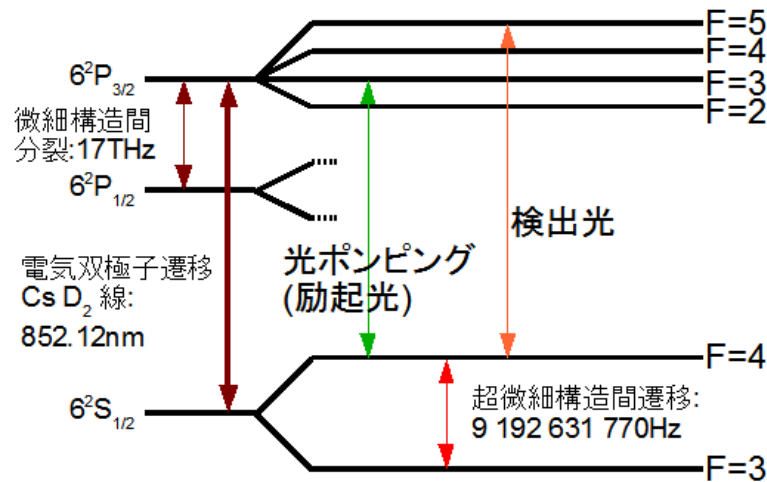
# マイクロ波標準



Norman F. Ramsey, Nobel Prize in Physics 1989  
"for the invention of the separated oscillatory fields method  
and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks"

# Cs1次周波数標準器(光励起熱ビーム型)

<sup>133</sup>Csエネルギー準位図



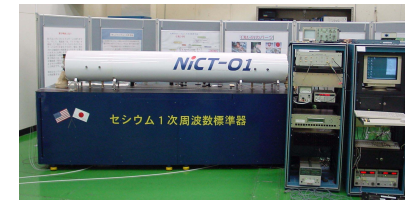
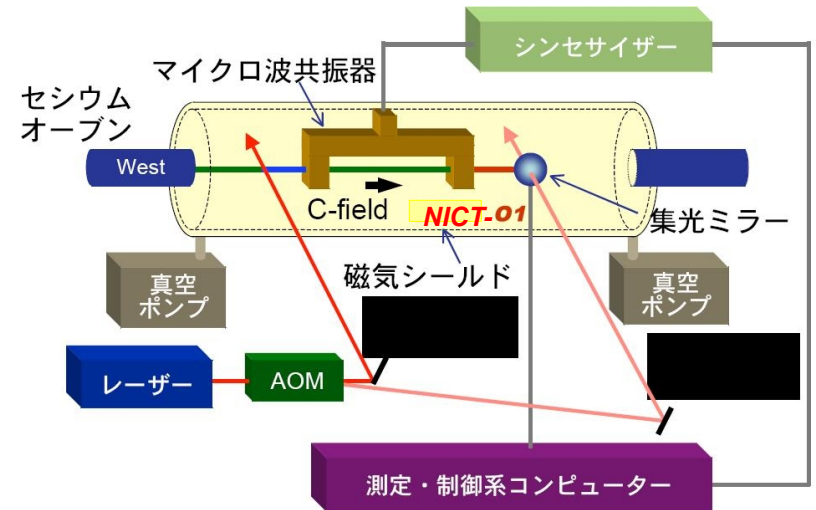
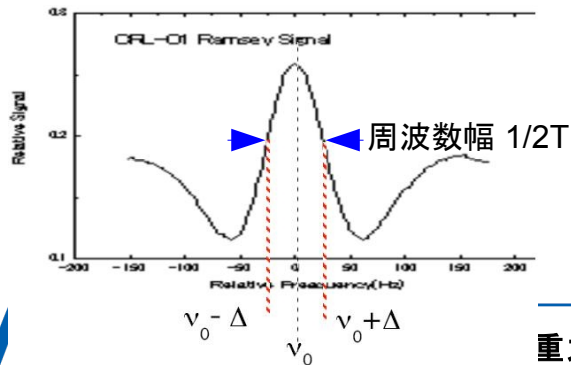
\* 実際はC磁場によるゼーマン分裂を起こし、(F=3, m<sub>F</sub>=0) ↔ (F=4, m<sub>F</sub>=0)間遷移を測定

**ラムゼー共鳴**: 電磁波を二回に分けて照射する(時間τ)と、その時間間隔が長いほど高感度に量子遷移周波数を精密に測定できる重要な技術。(1種の干渉効果)  
 遷移確率P(τ)は

$$P(\tau) = \frac{1}{2} \sin^2 b \tau [1 + \cos(\omega - \omega_0) T]$$

b: 照射電磁波の強度から決まる量  
 ω: 照射電磁波の周波数  
 ω<sub>0</sub>: 原子共鳴周波数

照射電磁波に依存  
 知りたい原子共鳴周波数と照射電磁波の周波数の差  
 二回の照射の時間間隔(ドリフト時間)



NICT-O1(2006年運用停止)

Physical effect	Bias (×10 <sup>-15</sup> )	Uncertainty (×10 <sup>-15</sup> )
Second-order Doppler	≈ -280	2
Second-order Zeeman	≈ 152 500	0.2
Cavity pulling	0	0.6
Cavity phase	±200	3.6
Blackbody	-19.8	0.5
Gravitational shift	8.2	0.1
Uncorrected biases	0	3.6
Combined type B uncertainty		5.5
Type A uncertainty		5.2e-15

統計誤差(TypeA)と系統誤差(TypeB)を合わせて、**確度 7 × 10<sup>-15</sup>**  
 安定度は 1 × 10<sup>-14</sup> / √τ 程度 **500万年に1秒のずれ**

A.Hasegawa et al., Metrologia, v41, p257 (2004).

## ・原子エネルギー状態の記述法

$2s+1$ : 多重度  $L_{J=L+s}$ : 全角運動量

$s$ : 全電子スピン、 $L$ : 軌道角運動量、 $J$ : 全軌道角運動量  
 $L=0, 1, 2, \dots$ をS, P, D...と表す. ex.  ${}^2S_{1/2}$ ,  ${}^3P_0$

## ・許容遷移(双極子遷移)の選択則

$\Delta J=0, \pm 1$  ( $J=0 \rightarrow J=0$ は禁止)

$\Delta S=0$  (異重項結合の禁制)

$\Delta L=0, \pm 1$

ex.  ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ ,  ${}^1S_0 \rightarrow {}^1P_1$  etc

強い遷移. 線幅~10MHz. レーザー冷却・量子跳躍検出に利用.

## ・禁制遷移(多重極遷移、異重項間、2重禁制 etc)

電気4重極子輻射や磁気双極子輻射などによる ex.  ${}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2D_{5/2}$ ,  ${}^2S_{1/2}(F=3) \rightarrow {}^2S_{1/2}(F=4)$  etc

核スピンとのカップリングによる

ex.  ${}^1S_0 \rightarrow {}^3P_0$ , (これは  $\Delta S \neq 0, J=0 \rightarrow J=0$ の2重禁制) etc

などによる.

非常に弱い遷移、狭線幅(Hz, mHz, uHz....). 時計遷移として使用.

## ・核スピン

奇数核(フェルミ粒子)の場合にのみ存在. 電子の周りに核スピンによる磁場を作り、超微細構造分裂させる.

cf. 偶数核(ボーズ粒子)の場合には内部で打ち消しあってゼロ.

# Cs1次周波数標準器(原子泉型)

- ・熱ビーム型と原子泉型の一番の違いは冷却原子を使用すること→装置全体の様子が大きく異なる
- ・原子冷却には**磁気光学トラップ**(magnet-optical trap: MOT)と**偏光勾配冷却**(polarization gradient cooling: PGC)を使用
- ・Moving Molassesで初速度4.5m/sで打ち上げ→ラムゼー共鳴のドリフト時間0.5s、ラムゼーフリンジの線幅1Hz以下 →宇宙へ(PHARAO)

(cf. ビーム型の場合 ドリフト時間7.5ms、フリンジ線幅100Hz程度)

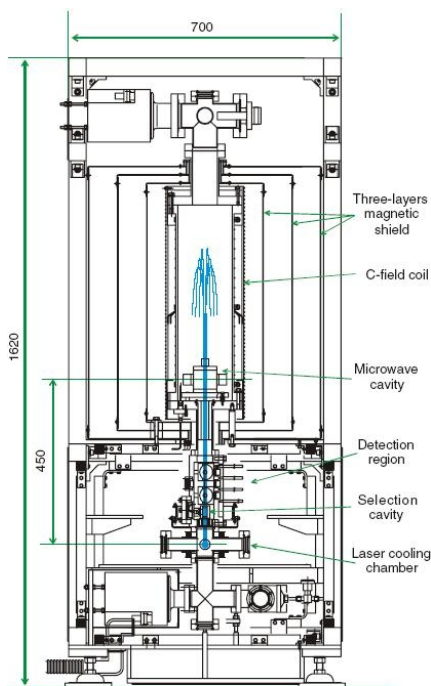
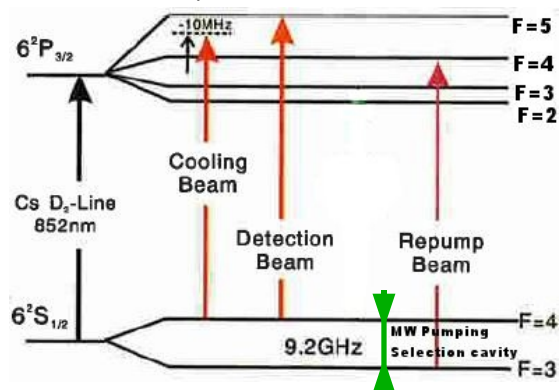
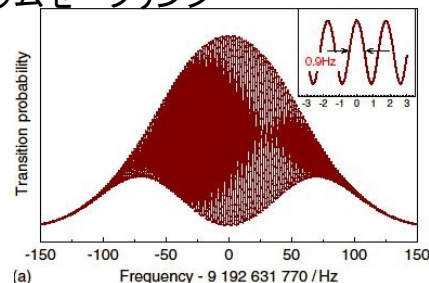


Figure 1. Physical package structure of NICT-CsF1.



ラムゼーフリンジ



Physical effect	Bias	Uncertainty
2nd Zeeman	72.5	<0.1
Collision <sup>a</sup>	-9.0	1.8
Blackbody radiation	-16.9	0.4
Gravity potential	8.4	0.1
MW-PW dependence	-0.7	0.3
Cavity pulling	0.0	<0.1
Rabi pulling	0.0	<0.1
Ramsey pulling	0.0	<0.1
Spectral impurities	0.0	<0.1
Light shift	0.0	<0.1
Distributed cavity phase	0.0	0.3
Majorana	0.0	<0.1
Background gas	0.0	0.3
Total (type B)		1.9

衝突シフトの不確かさの大きさが、原子泉型の限界を決めている

TypeA 1.0

●NICT-CsF1

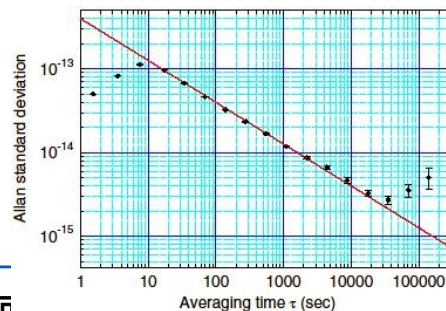
確度 :  $2 \times 10^{-15} \Leftrightarrow$  (1500万年に1秒のずれ!!!)  
安定度 :  $4 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$

M.Kumagai et al.,  
Metrologia, v45, p139, y2008

原子泉による世界最高確度  $7 \times 10^{-16}$  (@SYRTE(仏))

C.Vian et al., IEEE Trans. Instrum. Meas., v54, p833, y2005

原子泉周波数安定度



マイクロ波標準の限界

1. キャリア周波数が低い。光周波数標準に対して4, 5桁小。
2. 確度評価に時間がかかる。

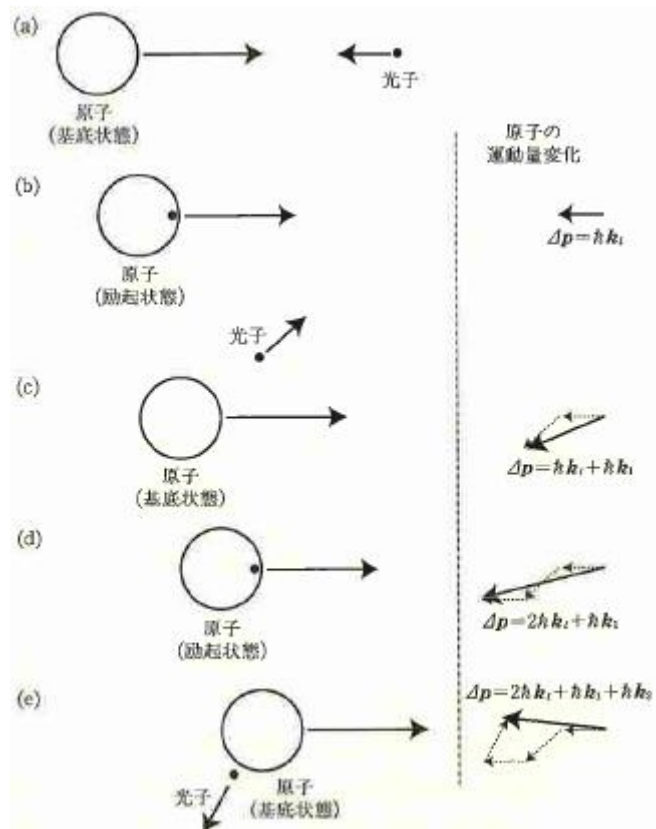
→光周波数標準への移行は自然な拡張



# 光と原子の相互作用1

清水富士夫, 応用物理, v60, p864, y1991  
 久我隆弘, 量子力学, 朝倉書店 2003  
 H.J.Metcalf et al., Laser Cooling and Trapping, Springer, 1999

## ・ドップラー冷却

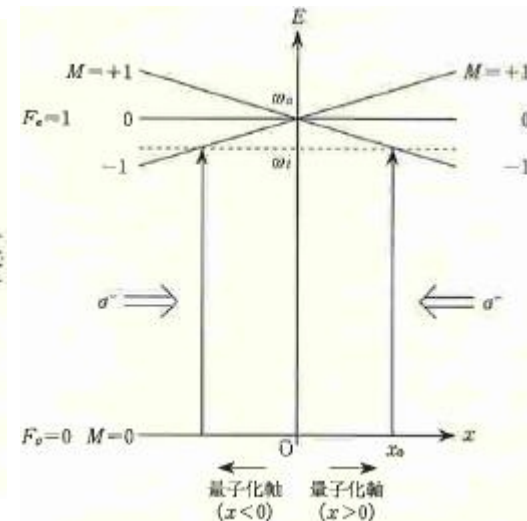
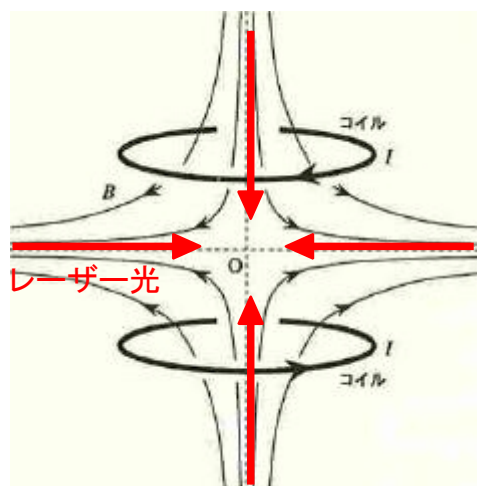


原子は光子からの運動量を後ろ向きに受け取り、減速される。  
 レーザー周波数は原子共鳴周波数よりもドップラー効果分だけ  
 低周波側にシフトしておく。

ドップラー限界温度  $T_D$ : 
$$T_D = \frac{\hbar \Gamma}{2k_B}$$

$\Gamma$ : 吸収スペクトルの自然幅

## ・磁気光学トラップ (MOT)



6本の円偏光レーザー光と不均一磁場を組み合わせ、  
 ゼーマン効果と原子の磁気副準位間遷移を利用。  
 ドップラー冷却と異なり、原子の冷却と**捕獲**が同時に可能。



Steven Chu  
 Nobel Prize in Physics 1997



Claude Cohen-Tannoudji

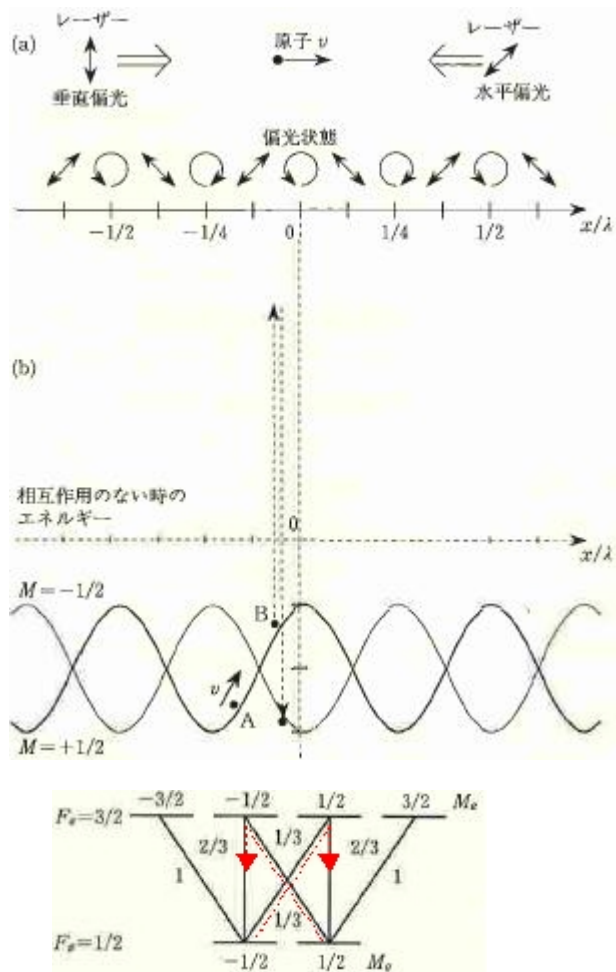


William D. Phillips

"for development of methods to cool and trap atoms with laser light"

# 光と原子の相互作用2

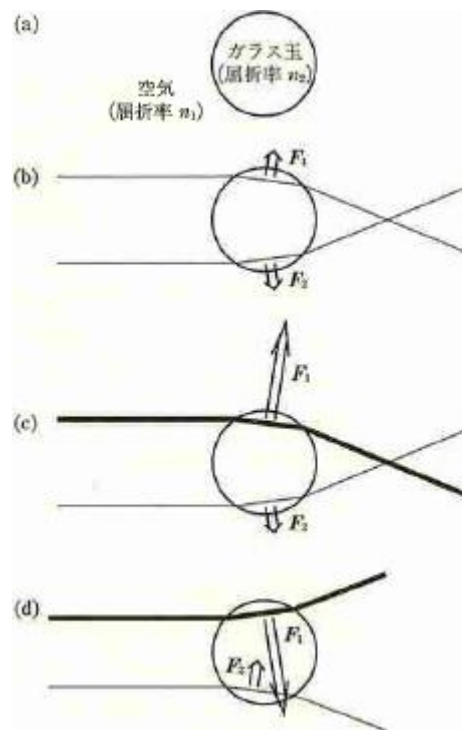
## ・偏光勾配冷却



原子がポテンシャルの山を登っては谷底へ戻される過程でエネルギーを失い続ける。

ドップラー極限温度以下に冷却可能.  $T_R = \frac{(\hbar k_L)^2}{2 M k_B}$

## ・光双極子カトラップ



光がガラス玉(原子)により屈折されるとき、光の運動量変化に応じた反作用がガラス玉に働く。つまり、光強度が強くなる方向に力を受ける。ドップラー冷却と異なり冷却はできない。→ 要予備冷却

# 光周波数標準



# 光周波数標準の利点

1. マイクロ波よりも4, 5桁高いキャリア周波数  $\Leftrightarrow$  禁制遷移、高いラインQ値  $> 10^{-15}$
2. 短時間(~数時間)で高安定度を達成可能  $\Leftrightarrow$  確度評価が容易になる

ただし、ドップラー拡がりへの対策が重要となる ( $\because$  温度数uKのとき、速度3cm/s  $\Rightarrow \Delta f/f = v/c = 10^{-10}$ )

レーザー冷却だけでは無理で、Lamb-Dicke領域への閉込め(Lamb-Dicke束縛)が必要 R.H. Dicke, Phys. Rev., v89, p472, y1953

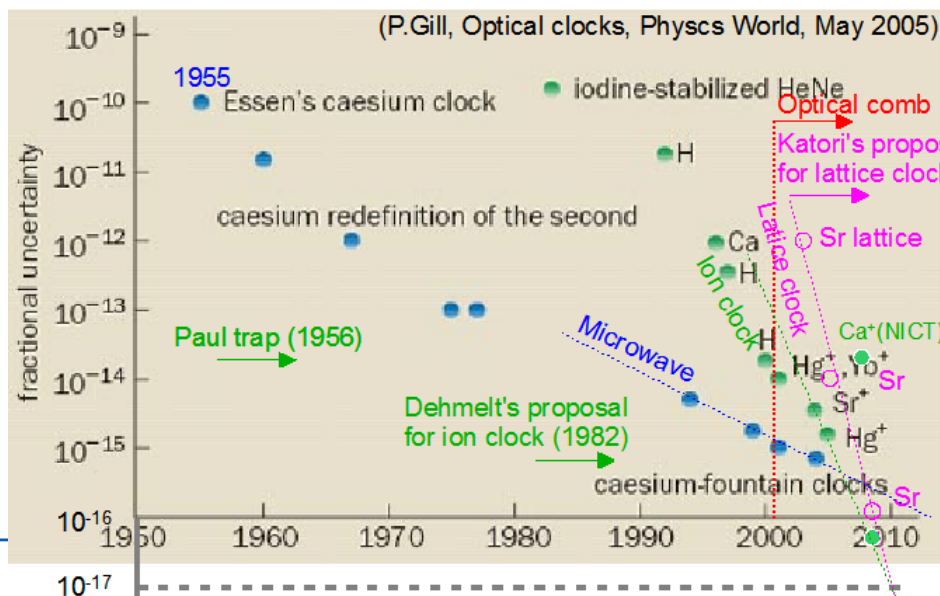
原子やイオンを、その吸収波長以下の大きさの領域に閉じ込めると、吸収スペクトルのドップラー拡がりを消失できる。

$\rightarrow$  1次ドップラーシフトの除去

**単一イオントラップ**と**光格子時計**が現在の候補

有望な原子・イオン種はアルカリ型かアルカリ土類型 (1. 構造が単純、2. 摂動に強い、(3. 使い易い光源がある))

統計性については、基本的にはフェルミ粒子(奇数核)が有望  $\rightarrow$  超微細構造分裂、Hyperfine interaction

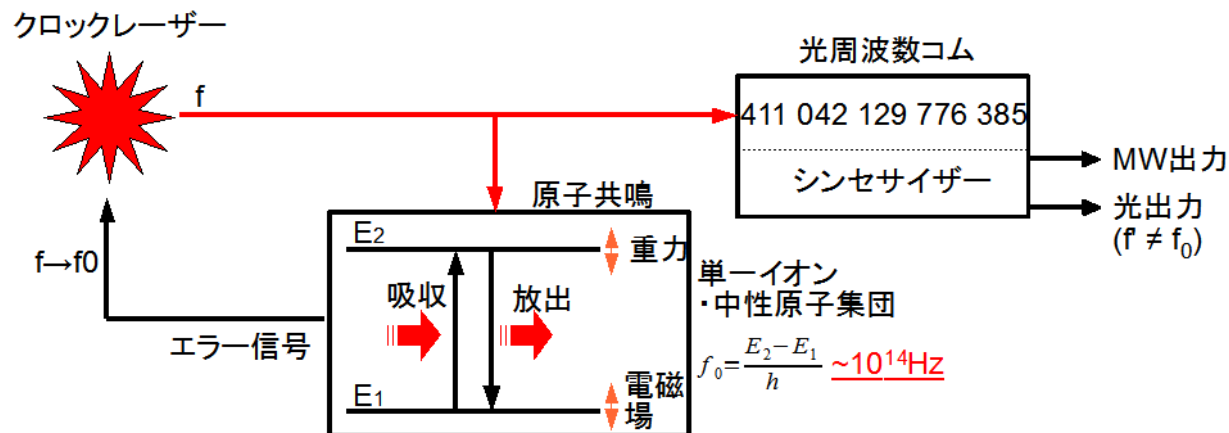
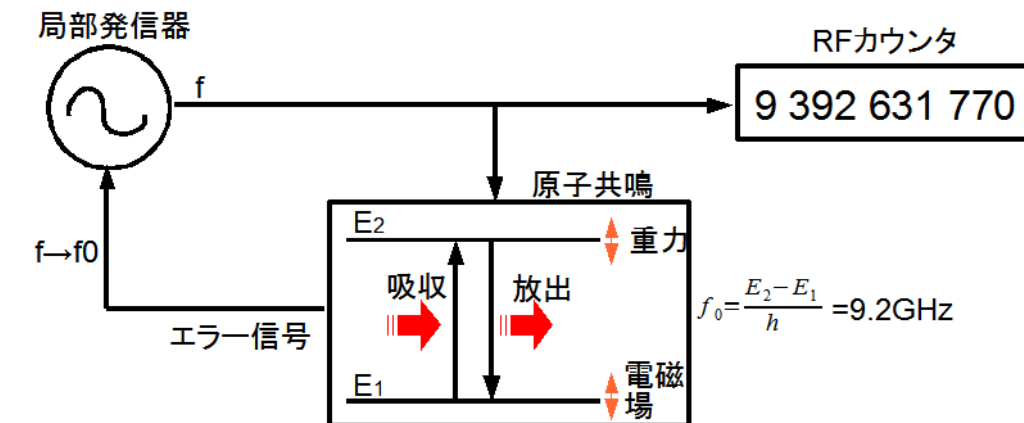


実際に、光時計の周波数確度は猛烈な勢いで向上中!!!

**確度・安定度  $10^{-18}$  への期待**  
 $\Leftrightarrow$  **200億年に1秒のずれ!!!**  
 (cf. 宇宙年齢137億年)

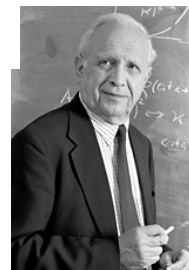
# 光周波数標準器の構成

Cs一次周波数標準器



光周波数標準器

1. 原子の基準 (単一イオン、光格子)
2. 超高安定レーザー (クロックレーザー)
3. 光周波数カウンタ (fsレーザー光コム)



Roy J. Glauber



John L. Hall



Theodor W. Hänsch

Nobel Prize in Physics 2005

for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

# イオントラップ

P. K. Ghosh, "Ion Traps", Oxford Sci. Pub.  
大槻義彦編, 占部伸二著, "現代物理学最前線3"

イオントラップは電磁場によって荷電粒子を空間に安定に閉じ込める技術

イオントラップを用いた極限計測 (いずれもレーザー冷却を併用)

(a) 量子計測 → 量子コンピュータ、量子通信(主にリニアトラップ)

(b) 周波数計測 → 周波数(時間)標準、物理定数計測 (主に少数イオンのトラップ)

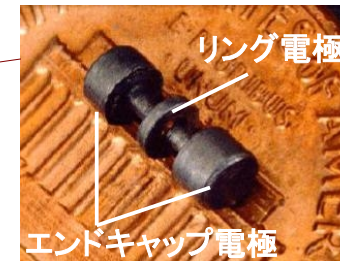
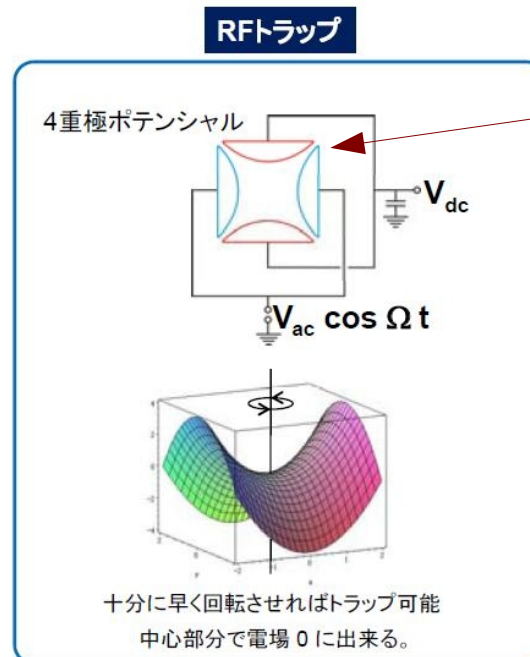
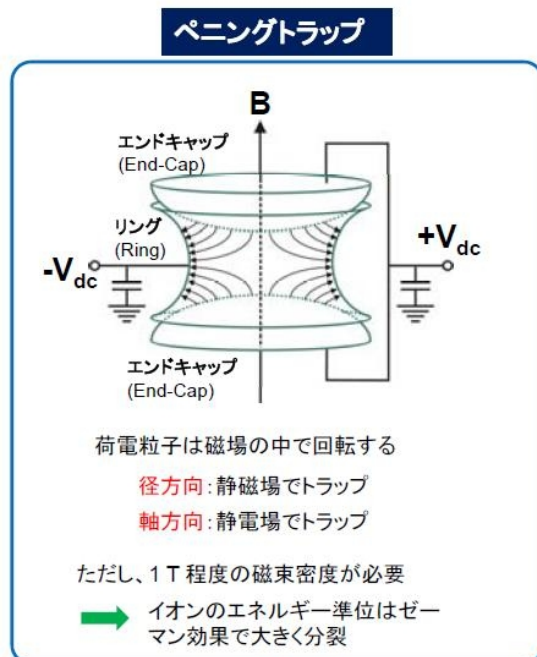


Hans G. Dehmelt



Wolfgang Paul

Nobel Prize in Physics 1989  
"for the development of the ion trap technique"



199Hg<sup>+</sup> ion trap (@NIST(米))



RFトラップ中の荷電粒子 (帯電したアルミ粒子) の軌跡の例

永遠運動(振幅大、低周波)と微細運動(振幅小、高周波)の足し合わせになっている。

\* 静電場のみでは荷電粒子を空間に安定に閉じ込められない(アーンショーの定理)

# イオントラップ

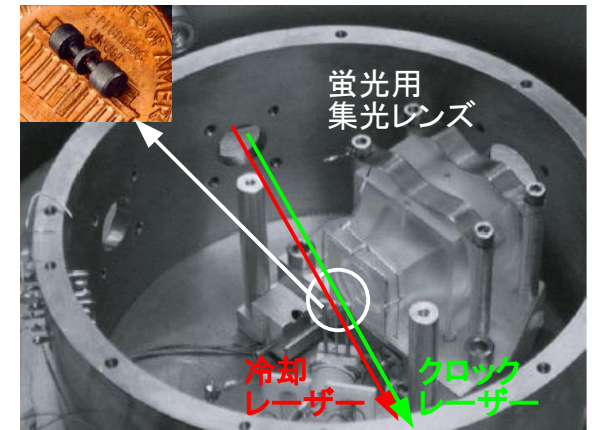
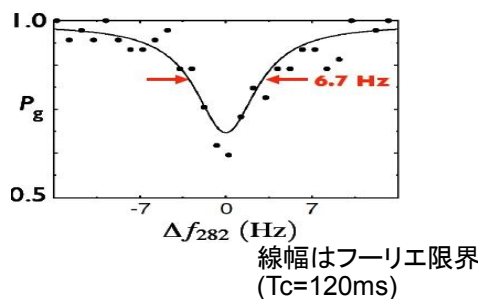
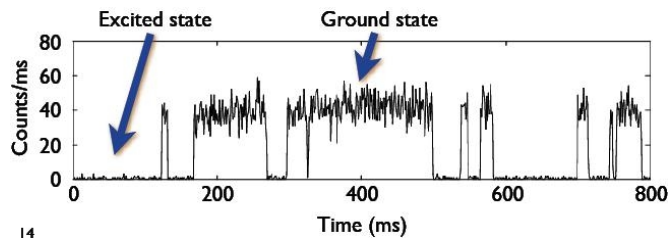
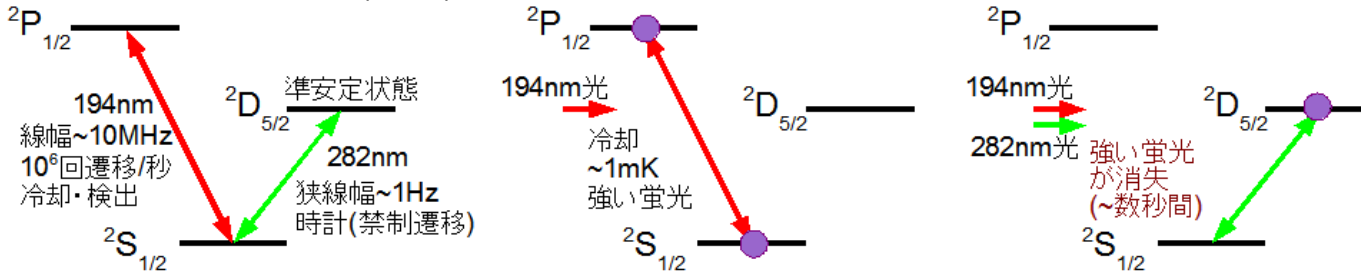
## 単一イオントラップの利点

1. 長時間(1日~1ヶ月)空間に束縛させることできる
2. ドップラー冷却でイオンをラム・ディッケ領域まで強く閉じ込めて、ドップラーフリー分光が可能
3. 他原子との衝突を避け、孤立させることが可能。(高真空化が可能)
4. 単一イオン化により、イオン同士の強いクーロン相互作用を排除

## 欠点

1. イオンが一個しかないので、SNRは低く、高い安定度が得られない → 量子射影雑音限界:  $\sigma_y(\tau) = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N}T_c\tau}$   $T_c$ : プローブ時間  $N$ : イオン数
2. 信号光の検出が困難 → 電子棚上げ法 (Electron Shelving) と量子跳躍 J.C. Bergquist et al., v57, p1699, y1986
3. 電気四重極シュタルクシフトが存在する。(通常は非常に小さい  $< 10^{-16}$ )

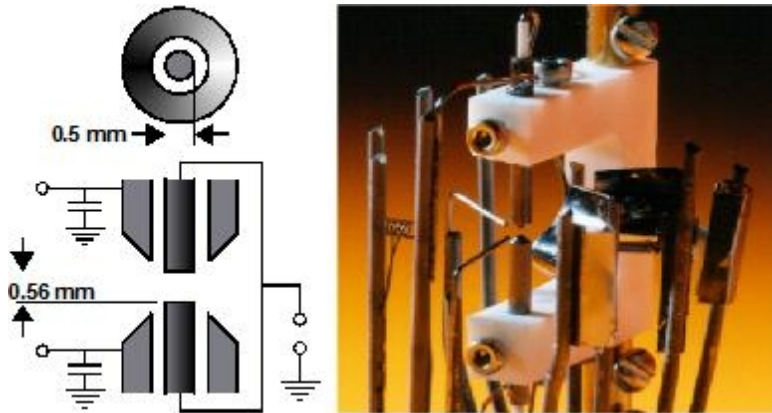
$^{199}\text{Hg}^+$  イオントラップの場合 (NIST)



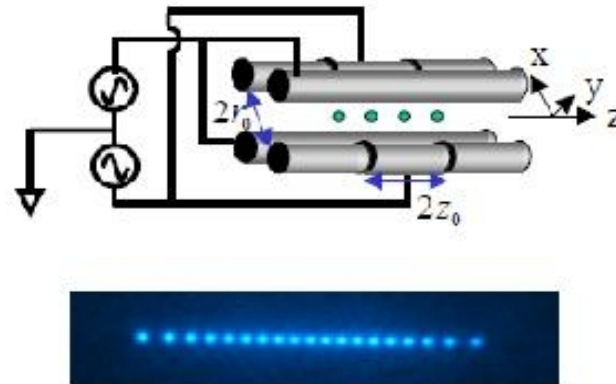
・トラップは黒体輻射シフトを除去するために液体ヘリウム温度に保たれている

# その他のRFイオントラップ

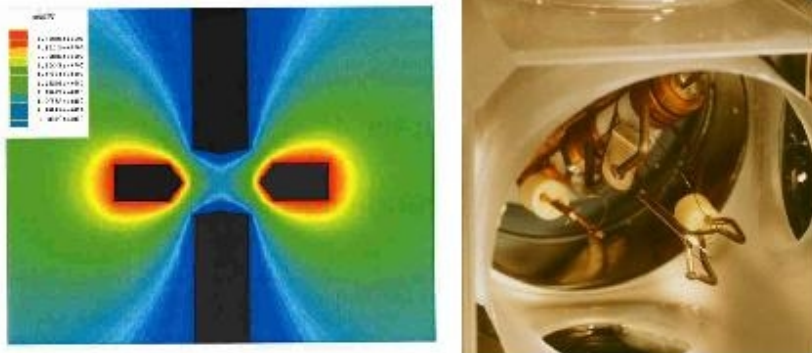
系を孤立させることができるのは魅力で、今もなお、様々な試行が繰り返されている。



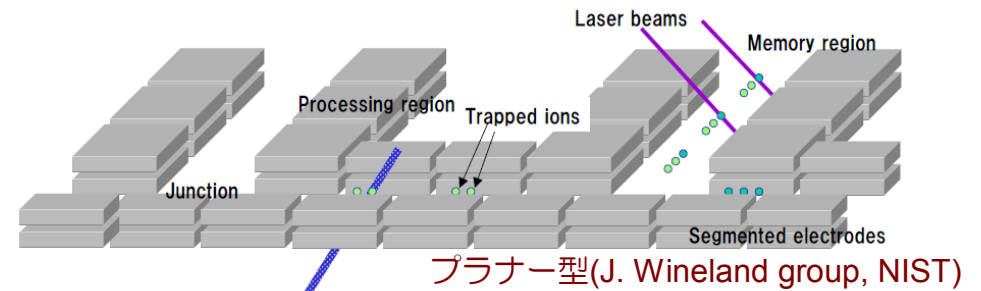
エンドキャップ型( $\text{Sr}^+$ , NPL(英))



リニア型( $\text{Ca}^+$ , NICT(日))

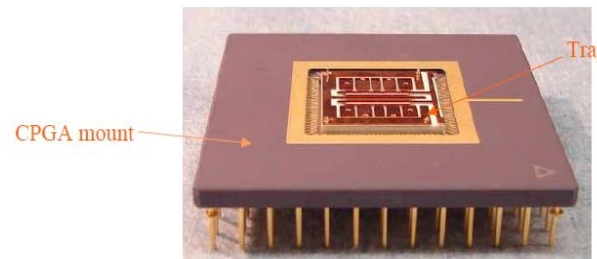


エッジ近似型( $\text{Yb}^+$ , PTB(独))

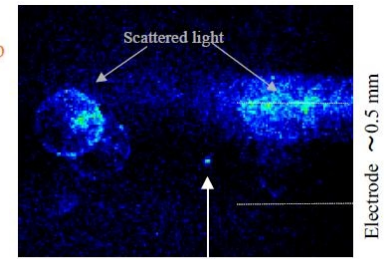


プラナー型(J. Wineland group, NIST)

エンドキャップ、エッジ近似型は単一イオン用で周波数標準で利用。  
リニア、プラナーRF型は複数イオン用で主に量子計算などに利用。  
特にプラナー型は大規模量子計算用に注目されつつある。  
形状以上に対称性、表面の均一性、堅牢性や微細運動補正が重要。



プラナー型( $\text{Ca}^+$ , 大阪大)



Single ion

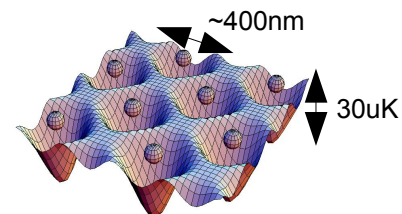
# 光格子時計

H.Katori, in Proc. 6th Symp. on Frequency Standards and Metrology, p.323, 2002.  
 M.Takamoto et al., Nature, v435, p321, y2005  
 香取秀俊, 応用物理, v74, p726, y2005

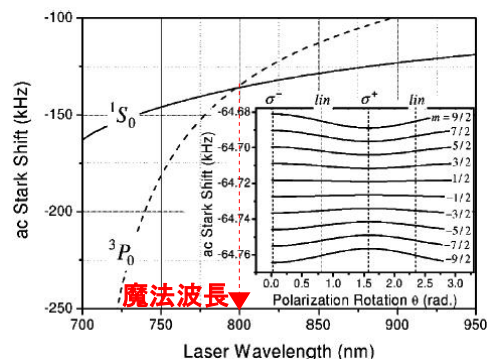
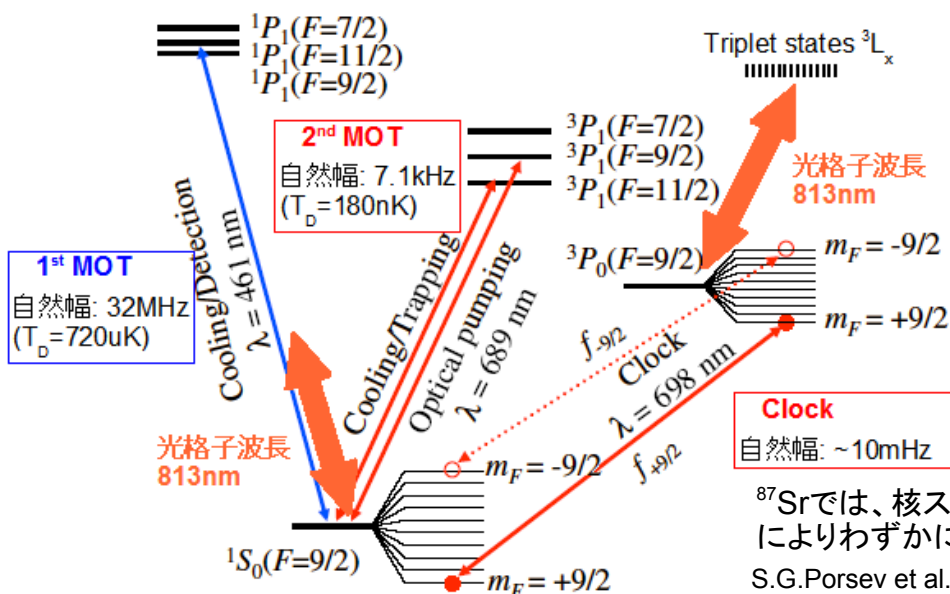
光定在波を利用した光双極子トラップに、多数個の中性原子を波長オーダーで束縛(ラム・ディッケ領域)すると同時に、ACシュタルクシフトが時計遷移の上下状態で相殺するような**魔法波長**を使用する1次標準器。

- ・魔法波長は香取准教授(2001, 東大)による本邦発のアイデア
- ・3次元光格子中に1個づつ原子を束縛すれば、原子同士の衝突を除去しつつ、 $10^5 \sim 10^8$ 個の原子共鳴を同時に観測できる → 単一イオントラップ(系の孤立)とこれまであった中性原子光時計(多数個)の良いところを併せ持つ

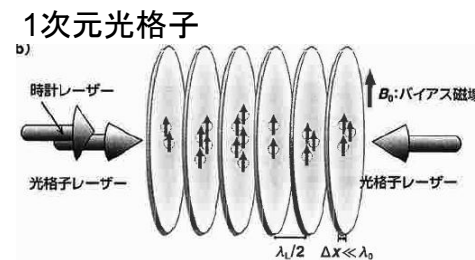
⇒ **確度・安定度で $10^{-18}$ レベル**を達成できると期待されている



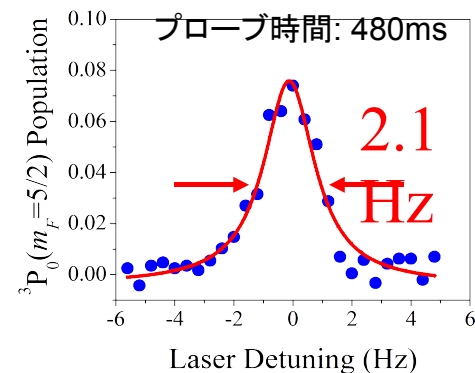
$^{87}\text{Sr}$ 光格子時計の場合(@東大,JILA,SYRTE)



H.Katori et al., Phys.Rev.Lett.,v91,p173005 (2003)



**$Q \sim 2 \times 10^{14}$ !!!**



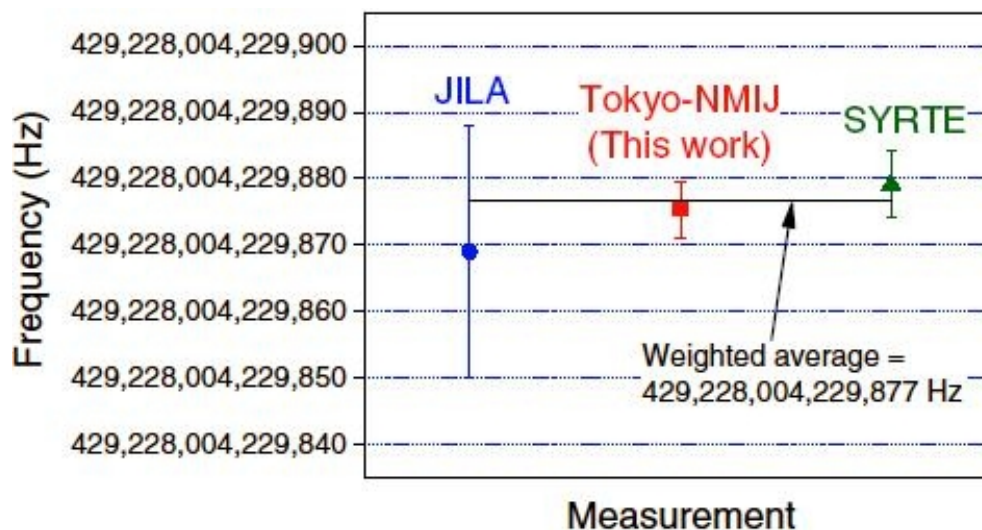
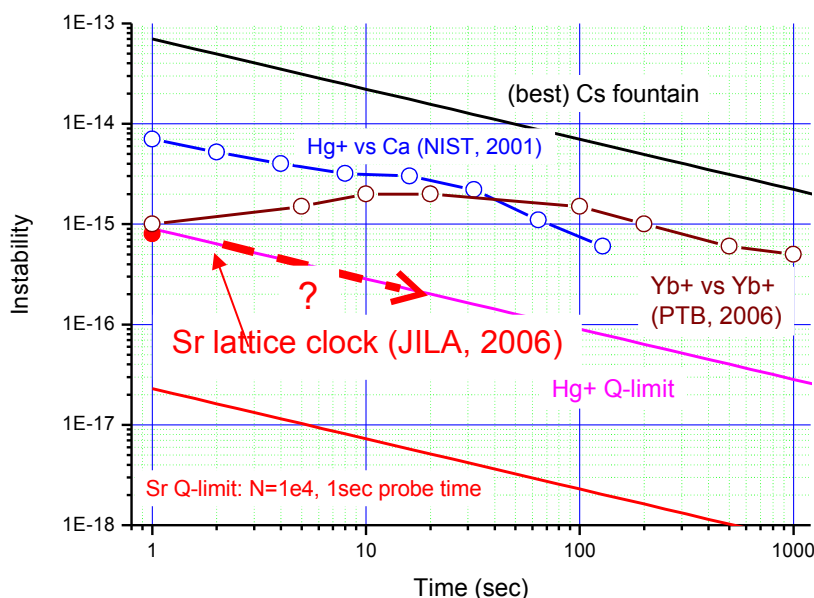
# 光格子時計

## 光格子時計の利点

1. 光シフトの摂動なしに多数個の中性原子を同時に精密分光可能(高SNR)
2. 光双極子トラップで自動的にラム・ディッケ領域に束縛して、ドップラーフリー分光が可能
3. フェルミ粒子ならスピンを揃えて1D光格子に、ボーズ粒子なら3D光格子に閉じ込めて、衝突シフトを減少させられる

## 欠点

1. 光格子中への束縛時間が短い(~1s?)
2. 冷却系が複雑 (3次元磁気光学トラップ、2段階冷却、光格子へのロード)
3. 衝突シフトの見積もりが不確定



M.Takamoto et al., J.Phys.Soc.Jpn., v75, p104302, y2006

光格子は単一イオントラップよりも  
2桁以上よい周波数安定度が期待できる  
確度評価もより短時間で可能。

東大(日)、JILA(米)、SYRTE(仏)の $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計で測定された  
 $1\text{S}_0 \rightarrow 3\text{P}_0$ 時計遷移周波数が誤差範囲で一致。  
2006年10月国際度量衡委員会で「秒の2次表現」に採択された  
(Cs原子時計を上回る性能を実現する可能性をもつ原子時計)

# 光格子時計

注目されている光格子

日本経済新聞 2008年(平成20年)12月28日(日曜日)

## 秒の歴史①

- 1799年 フランスのメートル法で、1秒を地球の自転に基づく1日の86400分の1と定義する
- 1884年 英グリニッジ天文台の場所を基準に世界標準時が定められる
- 1886年 日本政府が、東経135度の時刻を日本標準時と決める
- 1921年 英のショート、原子時計を開発する
- 1927年 米のマリソン、クォーツ時計を開発する
- 1949年 米連邦標準局(現在の標準技術研究所)、世界初の原子時計を開発する
- 1954年 東京大学の澤田ら、日本初の原子時計を開発する
- 1955年 英のエッセン、セシウムを使った原子時計を開発し計測を始める
- 1956年 国際度量衡委員会、1秒を1900年の1年間の31,556,925.9747分の1と定義する
- 1958年 この年の1月1日0時0分0秒が国際原子時の起点となる

グラフィックス・デザイン部 安藤智彰

## 光格子で「秒」が変わる

日本初の原子時計を製作する澤田光一(東京大学助教授=現名譽教授(東京都文京区)の東京大学、澤田氏提供)

世界一の原子時計

日本の初稿の原子時計開発を伝える記事(1960年6月3日)

光格子時計の研究を始める香取秀俊(東京大学准教授(東京都文京区)の東京大学)

原子の雲が光る光格子時計の中心部

光格子の概念図

閉じこめエネルギー

原子位置

光の干渉縞

## 秒の歴史②

- 1967年 国際度量衡委員会、1秒をセシウム原子が出すマイクロ波が9,192,631,770回振動する時間と定義する
- 1972年 現在の法定世界時が始まる。国際原子時と地球の運行のずれを補正する「うるう秒」が導入される
- 1980年代 イオン1個が出す光で時を測るイオントラップ時計の研究が盛んになる
- 2001年 東京大学の香取ら、光格子時計の理論を発表する
- 2005年 東京大学の香取ら、最初の光格子時計を開発する
- 2006年 米仏がそれぞれ光格子時計を開発、計測結果が日本とよく一致する。国際度量衡委員会、光格子時計を1秒の定義を決める次の標準の正式候補とする
- 2008年 東京大学が2種類の光格子時計を開発、精度に一致することを確かめる
- 2009年 1月1日午前9時(日本時間)に24回目のうるう秒が実施される

(敬称略)

「1秒」の定義が変わるかもしれない。現在最も正確に1秒を刻む原子時計をしのぐ時計が日本で開発され、世界の秒を決める次世代標準の有力候補になった。二〇〇九年は世界初の原子時計の開発から六〇年。人はどのように一秒を測ってきたのか、その歴史をたどってみよう。

東京・文京にある東京大学の研究室。実験装置にレーザー光を入れると、小さなガラス窓の向こうにふわりと青い光が浮かんだ。極めて低い温度に冷やされた

# 技術が刻む「1秒」の長さ

日本経済新聞 2008年12月28日より



# クロックレーザー

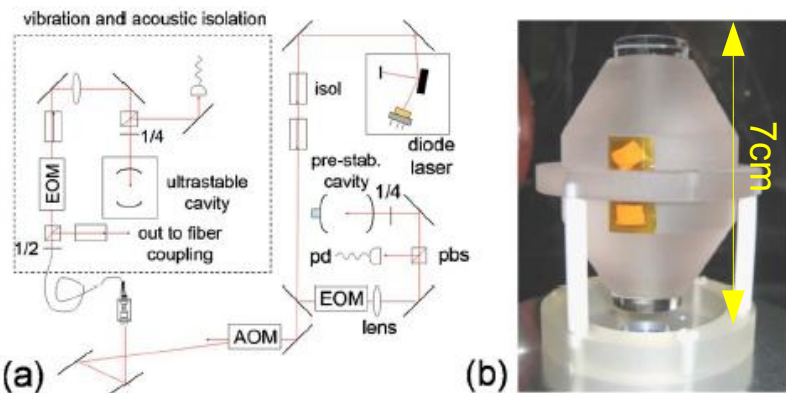
量子遷移を起こすためには超狭帯域高安定レーザーが必要  
要求

1. 時計遷移波長での発振
2. 狭線幅 (吸収信号の自然幅の1/10程度)
3. 短期安定度, 平均時間1s~100s (原子標準の量子限界程度)

→ 超高フィネスFabry-Perot共振器へPond-Drever-Hall法による安定化、FP共振器の振動と温度対策

その他、残留強度変調(residual amplitude modulation: RAM), 入射光量, ULEの経年変化等のノイズも考慮

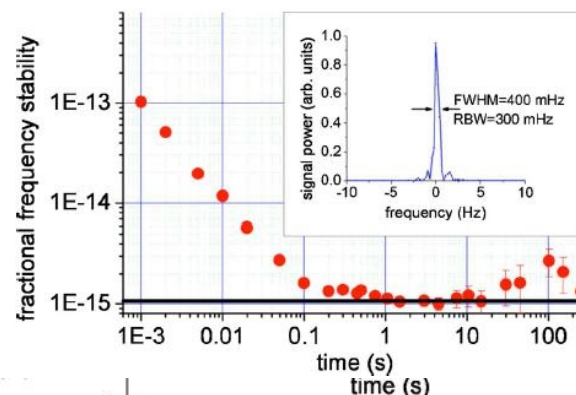
## ●<sup>87</sup>Sr光格子時計用時計レーザーの例(@JILA(米))



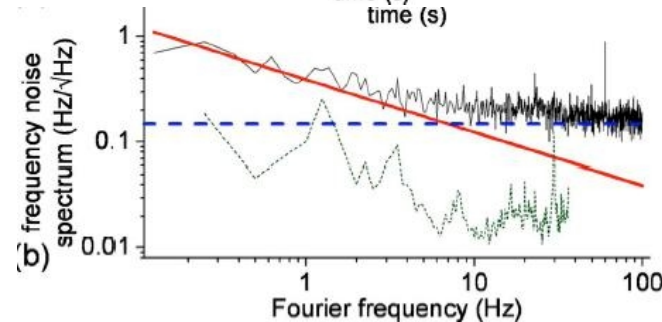
A.D.Ludlow et al., Opt.Lett., v32, p641, y2007

FP共振器の防振装置  
共振周波数0.5Hz

<http://www.minusk.com/content/home.html>



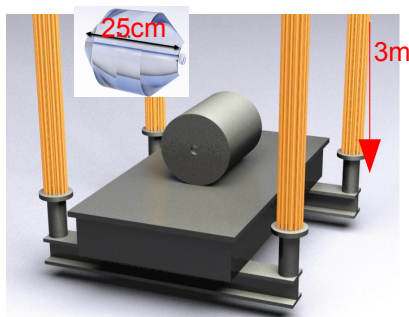
レーザー波長: 698nm  
レーザー線幅: 0.4Hz  
アラン分散:  $1 \times 10^{-15}$  (@1s)



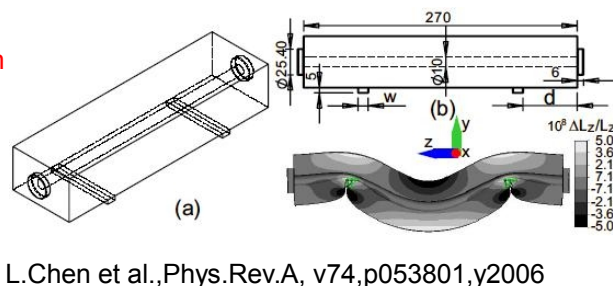
# クロックレーザー用基準光共振器

## ●有限要素法によるFP共振器の除振対策

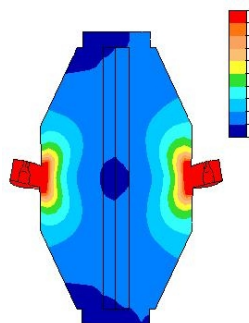
FP共振器の機械共振周波数より十分に低周波(<10Hz)の振動に対して、サポートの仕方を工夫することで振動に鈍感になるようにする。高周波振動(>10Hz)に対してはminus-K等の防振装置を利用する。



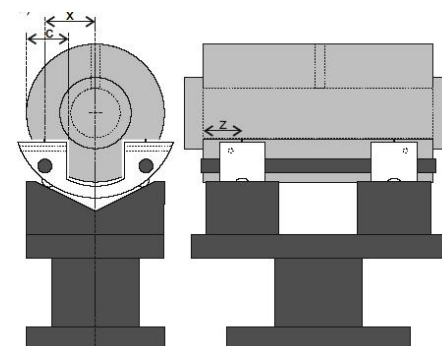
Young et al., Phys. Rev. Lett. v82, p3799 (1999)



L.Chen et al., Phys.Rev.A, v74,p053801,y2006



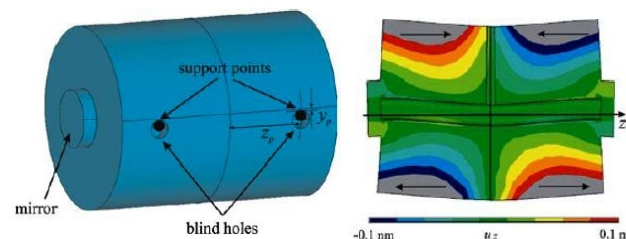
A.D.Ludlow et al., Opt.Lett., v32, p641, y2007



S.A.Webster et al., Phys.Rev.A, v75,011801,y2007

様々、除振対策が考えられたが、現状はFP共振器の熱雑音で線幅と安定度がリミットされていると考えられている。

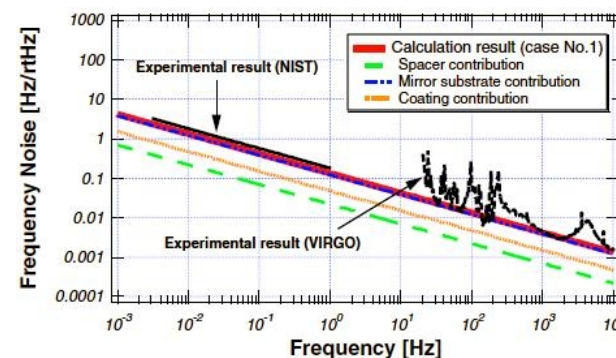
K.Numata et al., Phys.Rev.Lett., v93, p250602, y2004



T.Nazarova et al., Appl.Phys.B, v83,p531,y2006

熱雑音対策が昨今の重要課題

- ・共振器長を長くする + 除振・防振
- ・サファイア基材+冷却
- ・Dual atomic reference optical clock方式?
- ・狭線幅エネルギー準位を使ったレーザー発振?



# フェムト秒光周波数コム

T. Udem *et al.*, Phys. Rev. Lett. v82, p3568, y1999  
D.J. Jones *et al.*, Science. v288, p635, y2000

超短パルスKerrレンズモード同期レーザーの出力

- ・周期的なパルス列  $\Leftrightarrow$  光周波数コム
- ・パルス幅  $\Leftrightarrow$  光スペクトル幅

光周波数コムを構成するn番目のモードの周波数 $f_n$ :

$$f_n = n \text{ frep} + f_{\text{ceo}}$$

frep: パルス繰り返し周波数,

マイクロ波基準(up-conversion)

もしくはCWLレーザー(down-conversion)で制御

fceo: 自己参照法で測定  $\rightarrow$  1オクターブの光スペクトルが必要

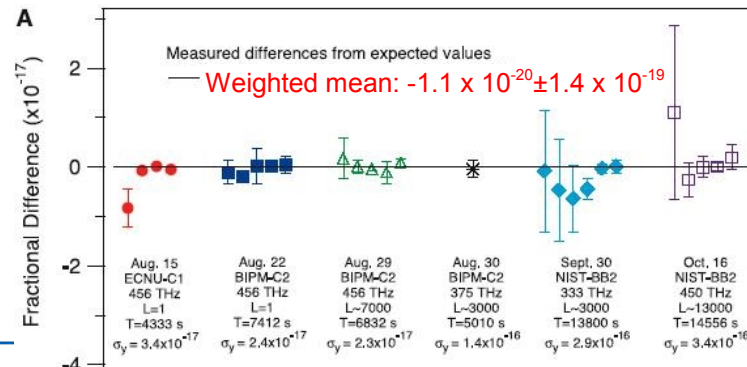
n: 市販の光スペアナで決定可能

## ● 光コムによる絶対周波数の計測精度

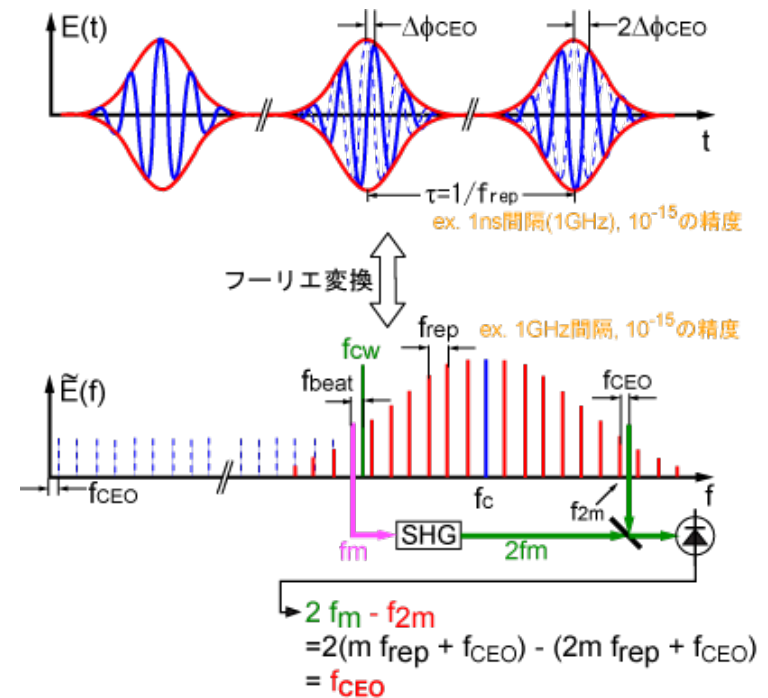
少なくとも $10^{-19}$ レベルまでは光コム技術は何ら問題ない

(複数台コムの比較で一致)

L-S. Ma *et al.*, Science, v303, p1843 (2004)

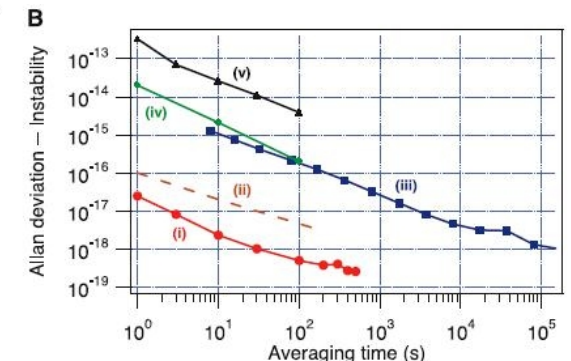


第15回 重粒子研究交流会 (2009年1月9日 国立大又台ニ鷹キャンパス)

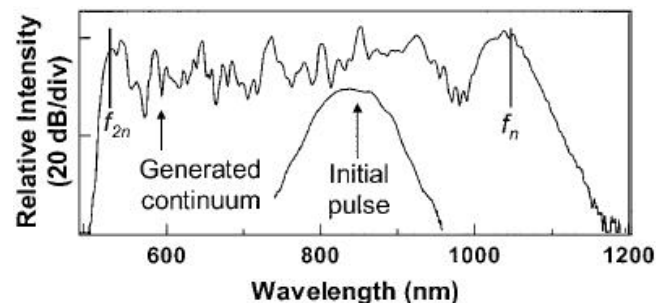
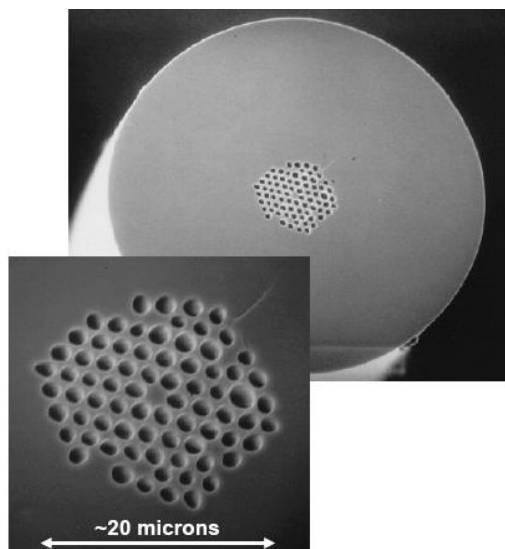


通常、レーザー共振器内で群速度と位相速度は異なる  
 $v_g \neq v_p$

$\rightarrow$  パルス包絡線とキャリアピークがパルスごとにずれる  
これがcarrier-envelopeオフセット周波数(fceo)の原因



# フォトニック結晶ファイバーによる波長拡大



D. J. Jones, Science, v288, p635 (2000)



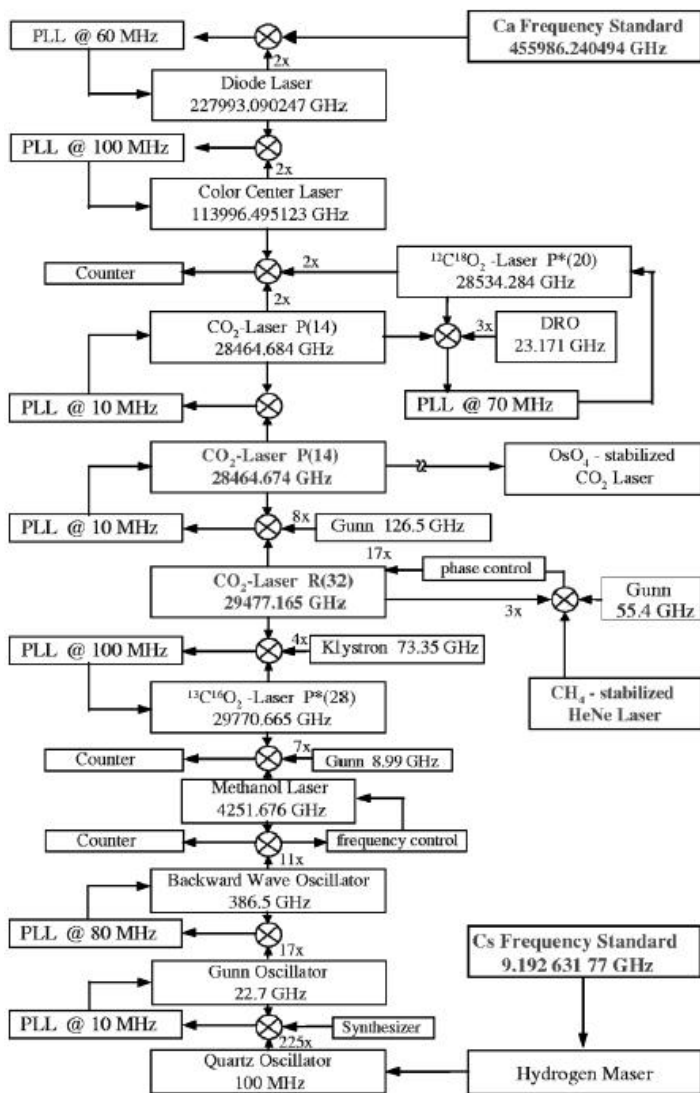
1. 微小コア( $\sim 1\mu\text{m}$ )にパルス光を伝播させる  $\rightarrow$  強い自己位相変調
2. 波長800nm付近で零分散を実現  $\rightarrow$  パルス幅を拡げないため、長距離に渡り強電場を伝播させ、大きな非線形効果達成. J.C.Night, Nature, v424, p847, y2003

## 問題点

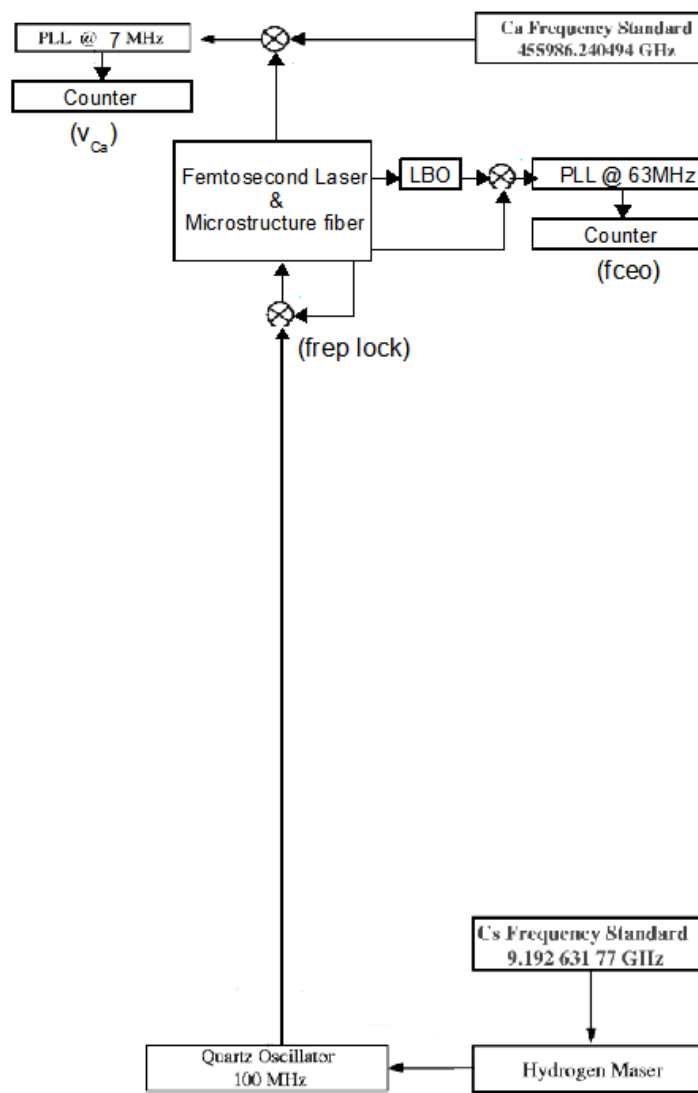
1. 長期的なアライメント (ビームの微小コアへの導入)
2. 信頼性 (ファイバー端面の劣化による交換が必要)  $\rightarrow$  シーリングやエンドキャップによる対策
3. ノイズ (ファイバー透過光にexcess強度ノイズが発生)  $\rightarrow$  多大な努力が図られており改善の方向に向いている.

# 周波数チェーンvs光周波数コム

Conventional chain:



Femtosecond comb:



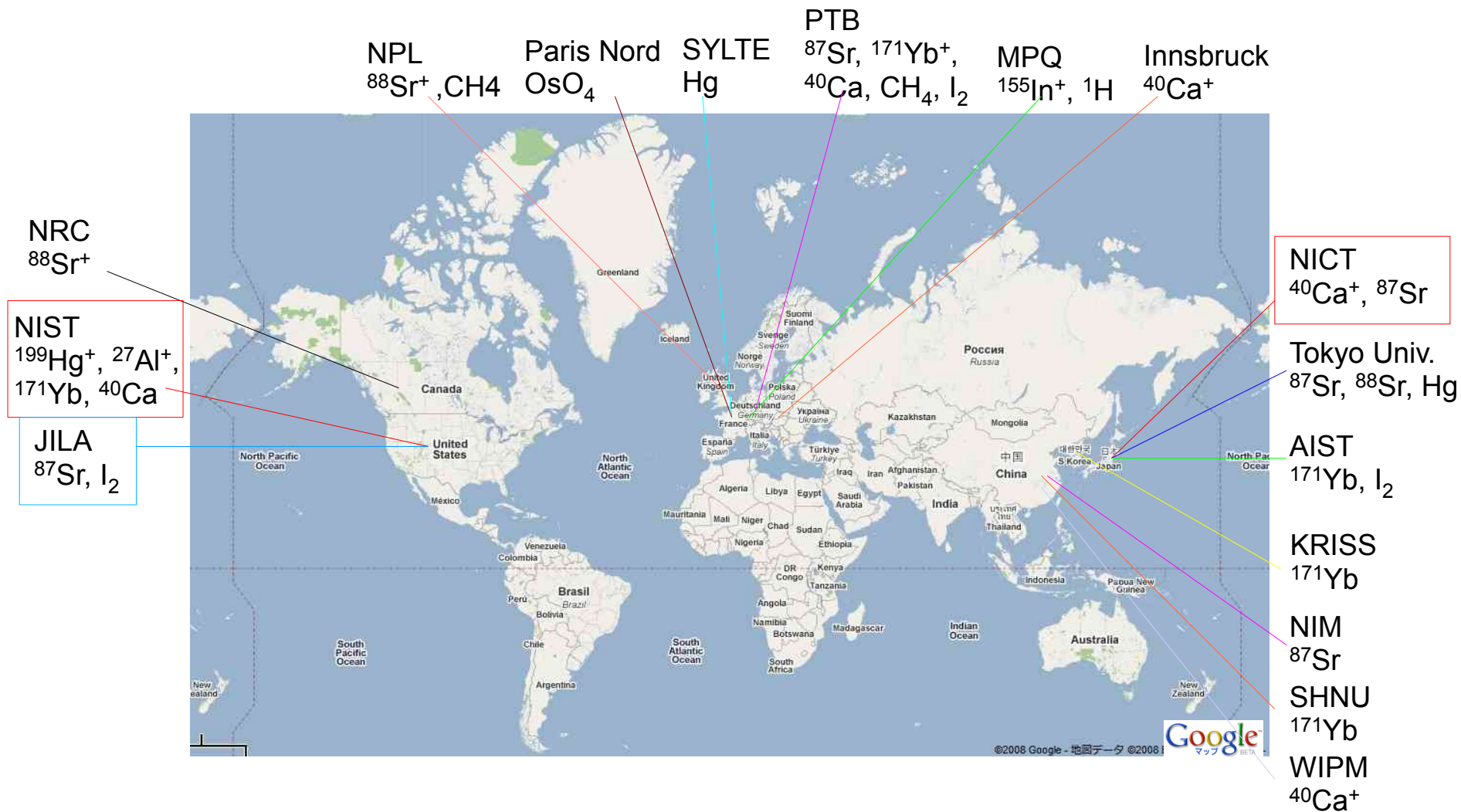
H. Schnatz et al.,  
Phys.Rev. Lett.,  
v76, p18, y1996.

光周波数コムの登場により、計測精度・人・場所・時間・予算に関する問題が一掃された

# 光周波数標準の現状

# 世界の状況

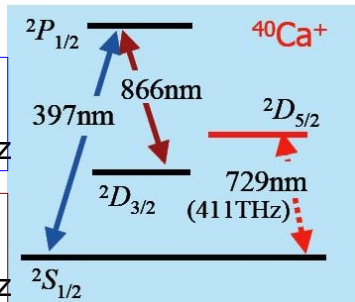
\* 光周波数標準のみ



# 単一<sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>イオントラップ (NICT)

K.Matsubara et al., Applied Physics Express, v1, p06701 (2008)

目標：小型で高精度( $\sim 10^{-15}$ )な標準器の構築

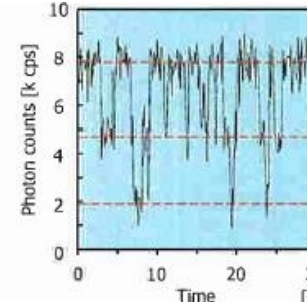
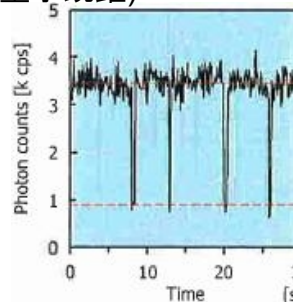


冷却  
強い遷移  
線幅 $\sim 10$ MHz

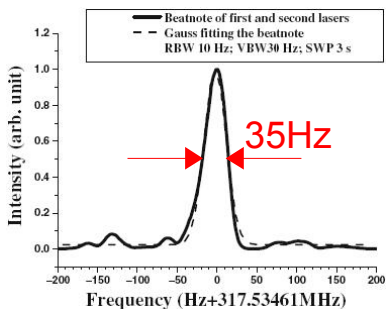
リポンプ  
強い遷移  
線幅 $\sim 10$ MHz

時計  
電気四重極子遷移  
( $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ )  
自然幅 $\sim 0.2$ Hz

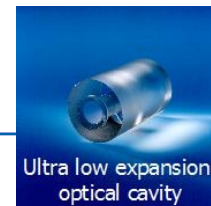
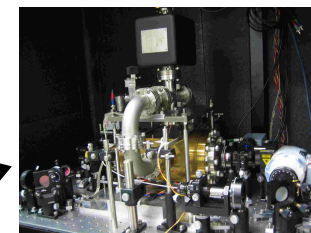
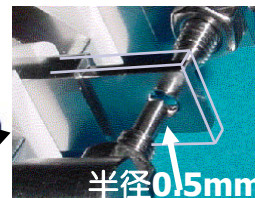
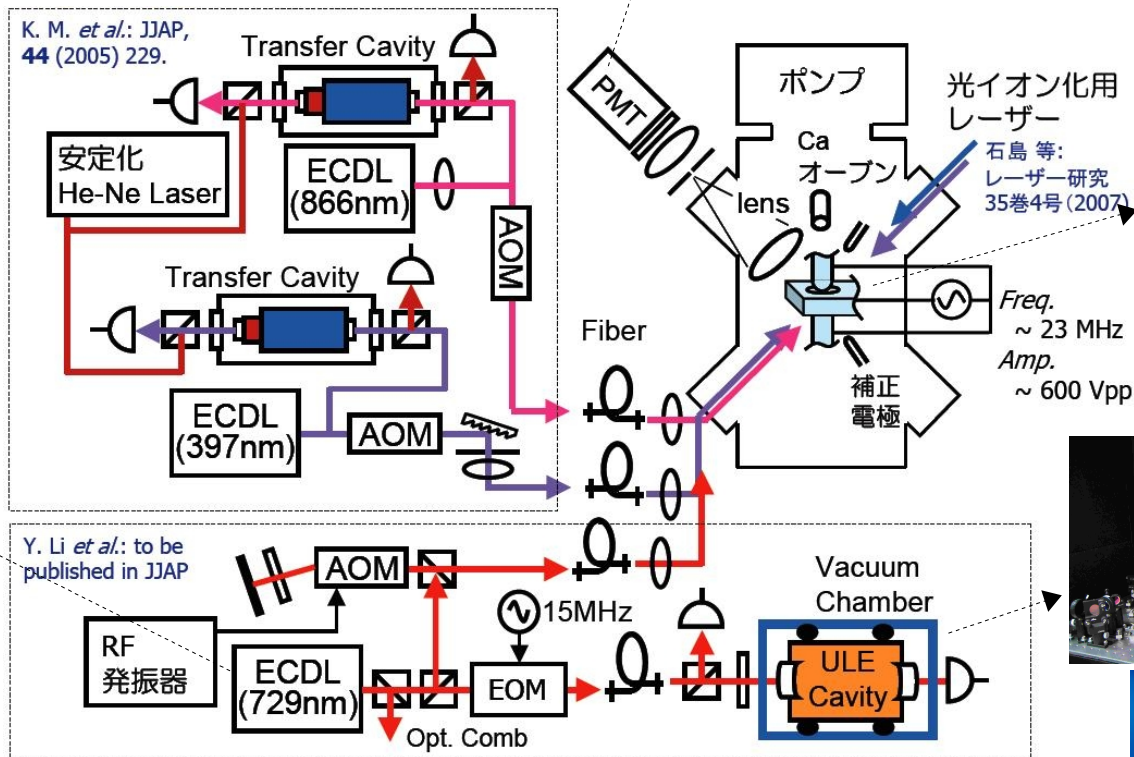
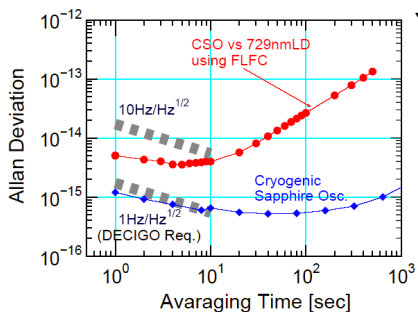
単一<sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>の四重極子遷移 (量子跳躍)      2個の<sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>の四重極子遷移



729nmクロックレーザー線幅



729nmクロックレーザー周波数安定度



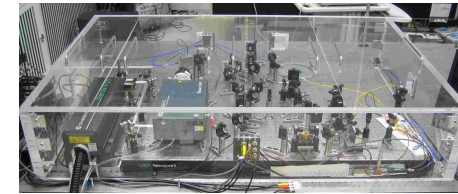
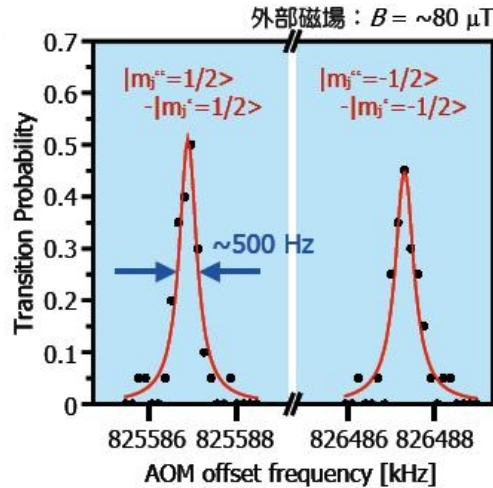
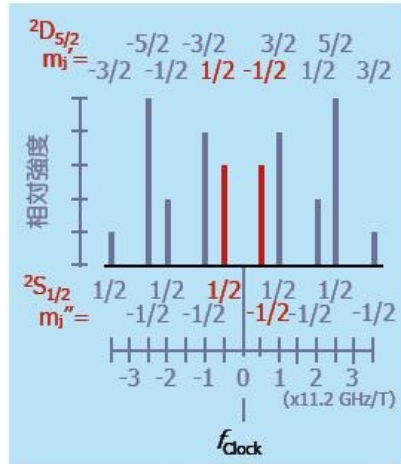
UTCにリンクされた光周波数コムへ



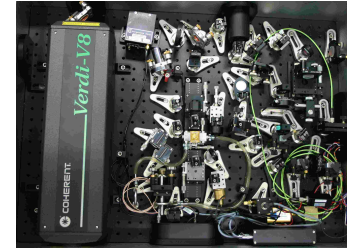
# 単一<sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>イオントラップ (NICT)

K.Matsubara et al., Applied Physics Express, v1, p06701 (2008)

$\Delta m_j = 0$ のZeeman分裂



Gigajet20W, Gigaoptics GmbH



VenteonOS, Nanolayers GmbH

光コムの計測の不確かさ:  
 $4.5 \times 10^{-18}$

偶数核イオンでもゼーマン分裂したスペクトルペア( $\Delta m_j = 0, m_j \neq 0$ )を測定し、それらの平均を取ることで高精度( $\sim 10^{-15}$ )を実現できる:

$$f_{\text{clock}} = (f_{m_j=1/2} + f_{m_j=-1/2})/2$$

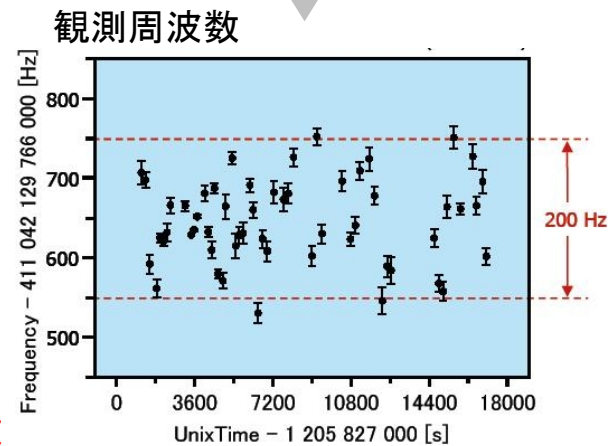
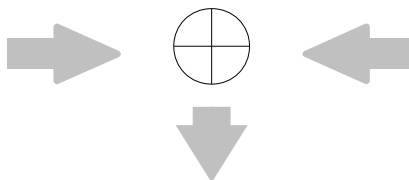
H.S.Margolis et al., Science, v306, p1355, y2004

四重極遷移が起きたときのクロックレーザー周波数を光周波数コムで精密計測

## 系統誤差(TypeB)

- 重力シフト: -3.4 (< 0.1) Hz
  - 黒体輻射シフト: -0.4 (< 0.1) Hz
  - 四重極子シフト: - (< 5) Hz
  - 2次Zeemanシフト: - (< 0.2) Hz at 80  $\mu$ T
  - ULE Cavityのドリフト: - (< 2) Hz
  - 外部磁場のドリフト: - (< 0.2) Hz
- $f_{\text{systematic}} = -3.8 (\pm 5.4)$  Hz

理論計算または測定で求める



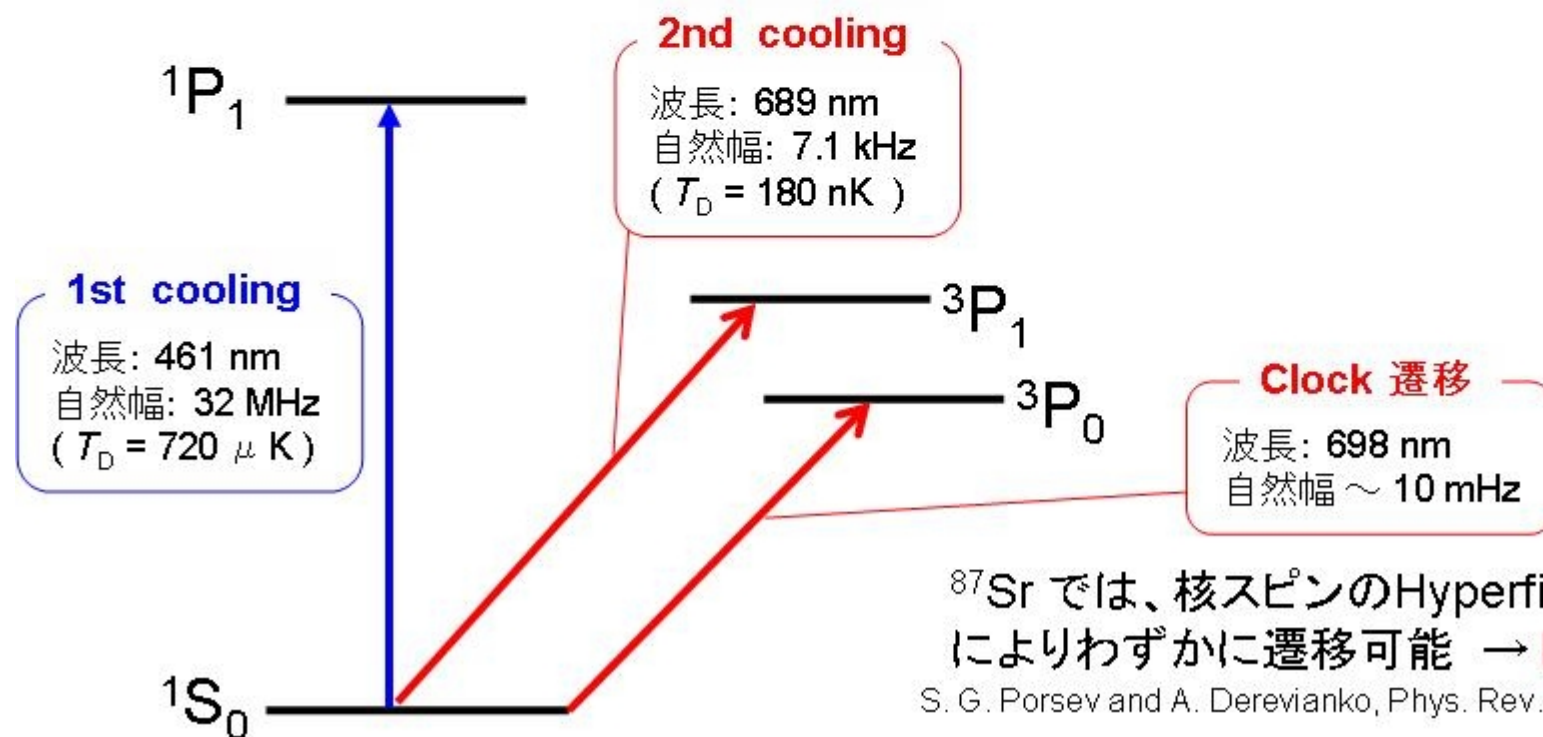
<sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>イオンの時計遷移周波数  
**411 042 129 776 385 (18) Hz**  
精度  $4.4 \times 10^{-14}$

統計誤差(TypeA)を小さくするために何回も計測

# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

- 原子番号 : 38 (アルカリ土類金属)
- 電子配置 :  $[\text{Kr}] 5s^2$
- 4つの安定同位体  
(ボゾン3つ、フェルミオン1つ)

同位体	存在比(%)	核スピン	
$^{88}\text{Sr}$	82.58	0	ボゾン
$^{86}\text{Sr}$	9.9	0	ボゾン
$^{87}\text{Sr}$	7.0	9/2	フェルミオン
$^{84}\text{Sr}$	0.56	0	ボゾン



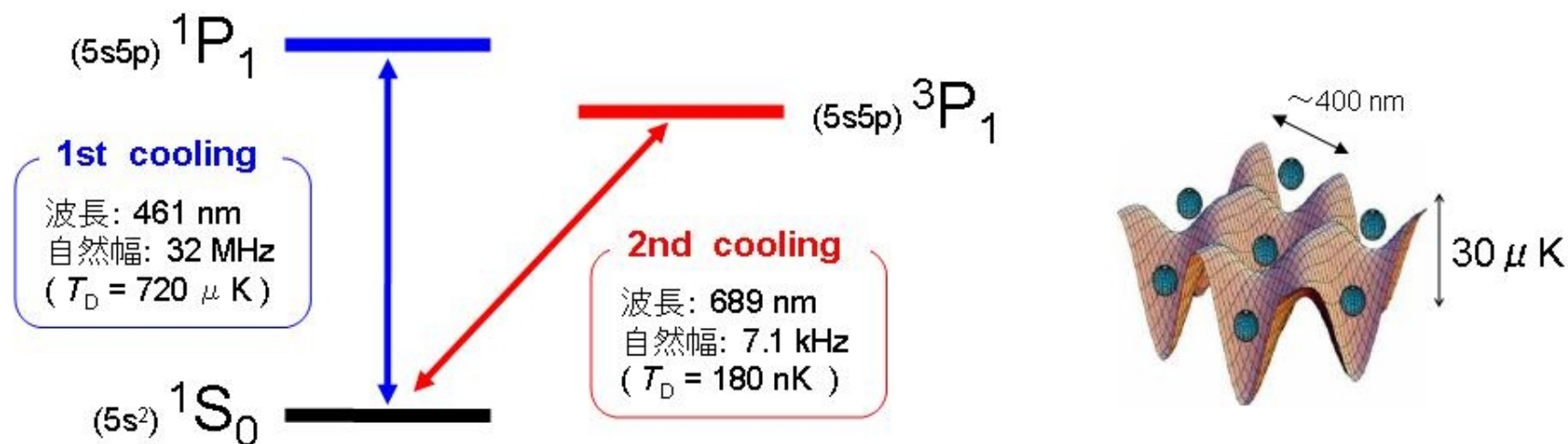
$^{87}\text{Sr}$ では、核スピンのHyperfine interactionによりわずかに遷移可能 → **時計遷移**  
 S. G. Porsev and A. Derevianko, Phys. Rev. A **69**, 042506 (2004)

# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

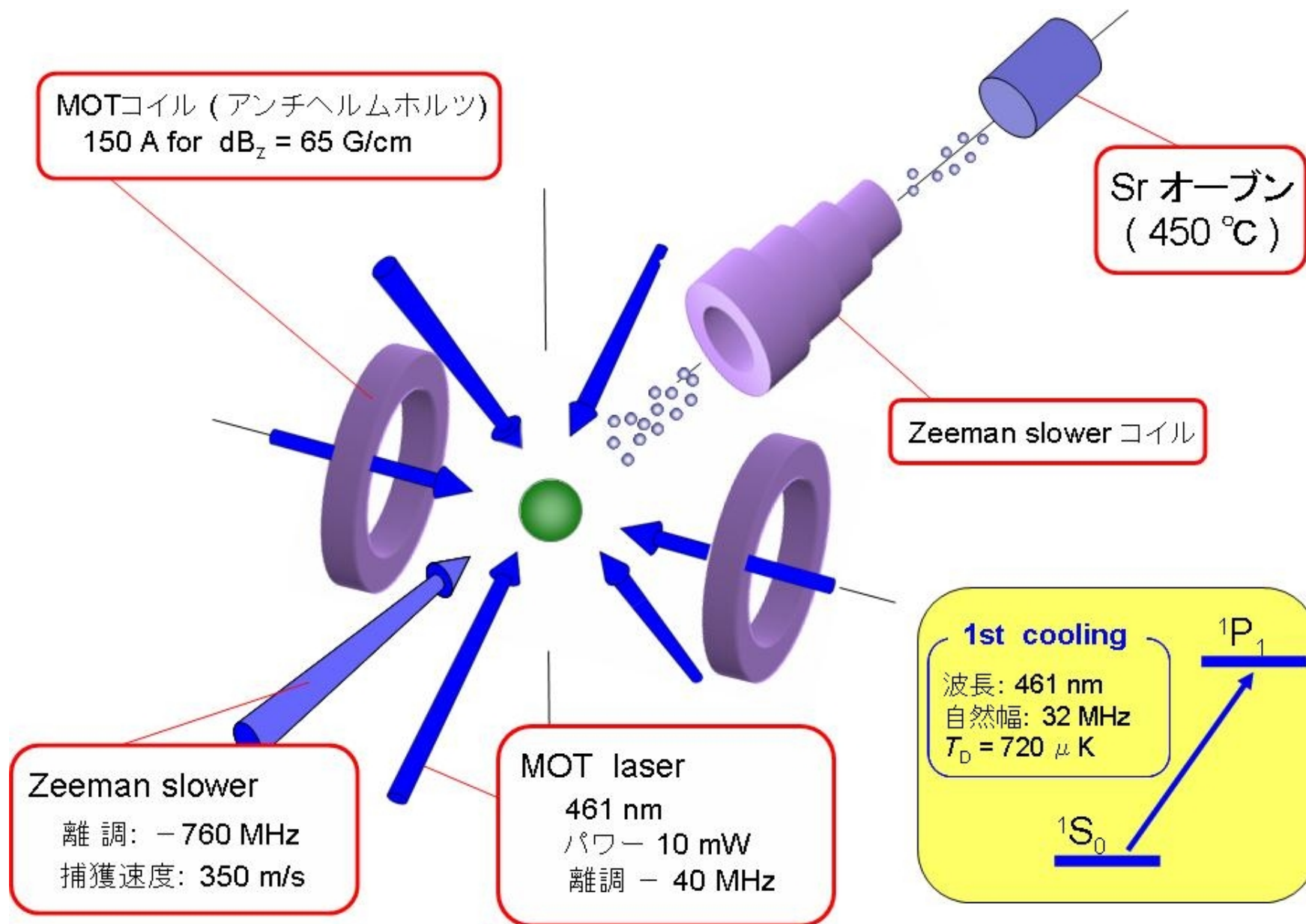
## 光格子時計実現までのステップ

1.  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$  遷移を用いた  $^{87}\text{Sr}$  原子の減速 & 磁気光学トラップ (Blue-MOT)  
(原子の温度  $\sim 1 \text{ mK}$ )
2.  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$  遷移を用いた磁気光学トラップ (Red-MOT)  
(原子の温度  $\sim 1 \mu\text{K}$ )
3. Red-MOTの原子を光格子ポテンシャルにロード
4. 光格子ポテンシャル中でクロック遷移の分光
5. クロックレーザーの周波数にフィードバックをかけ、原子時計として運用

本発表  
( $^{88}\text{Sr}$ )

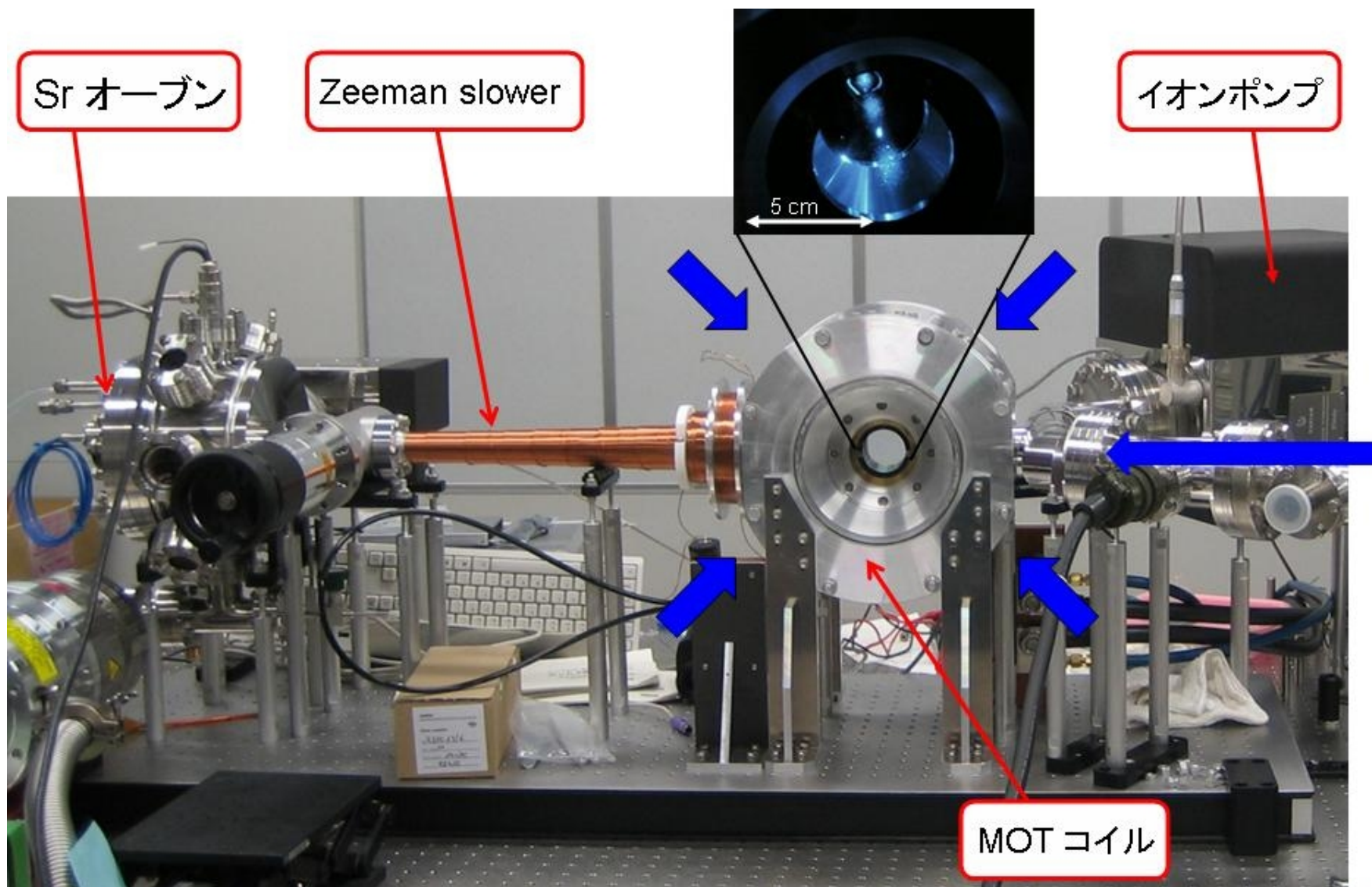


# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)



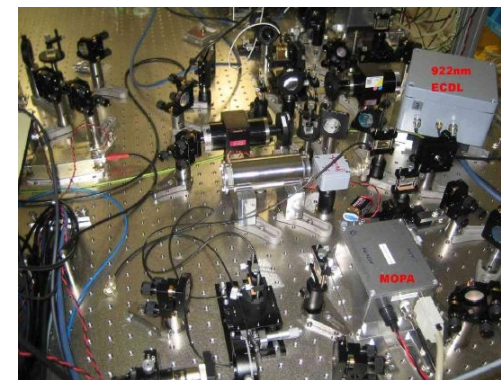
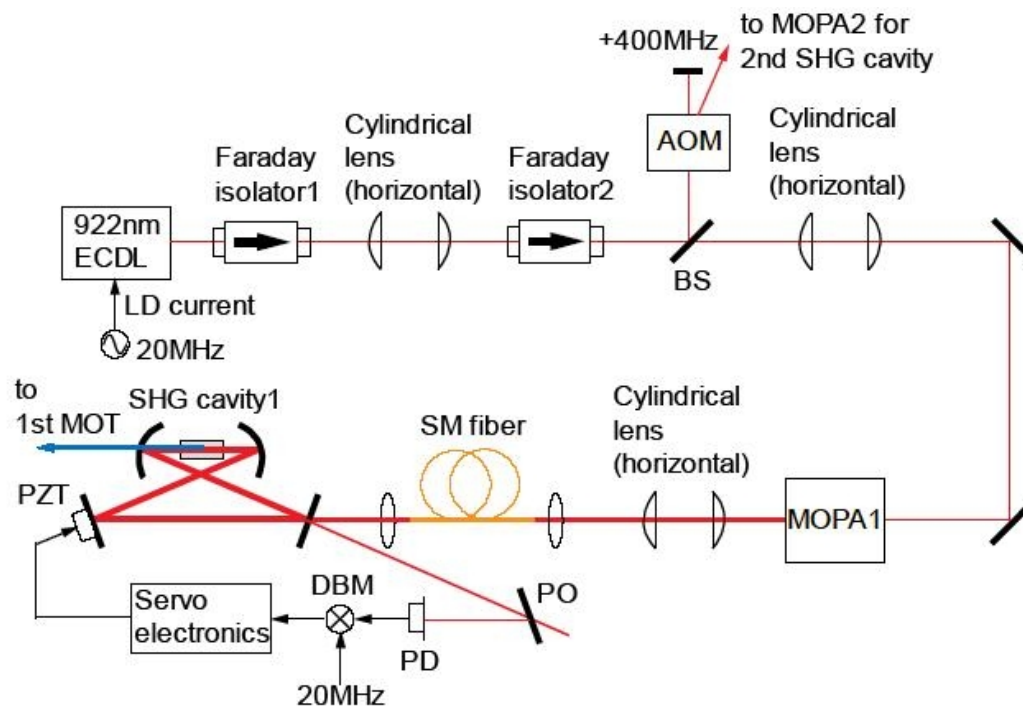
# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

Zeeman slower & Blue MOT



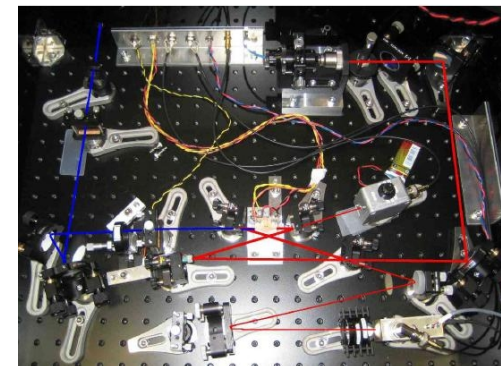
# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

## Blue MOT用461nm光源



922nm ECDL & MOPA

第2高調波発生用外部共振器



マスターレーザー：922nm外部共振器型半導体レーザー(ECDL),  
Eagleyard Ridge Waveguide LD

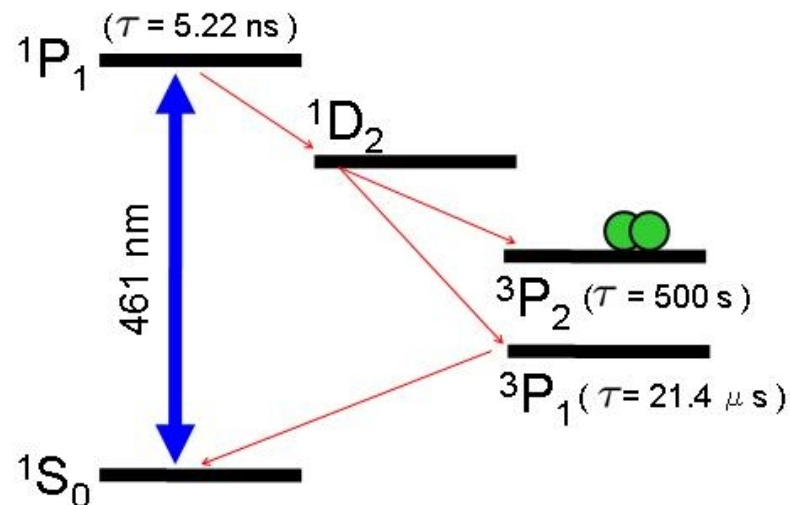
光増幅器：テーパー型半導体素子(Eagleyard, center: 915nm), 出力860mW, 利得102

SMファイバー：偏光保存SMファイバー(OZ optics, cut-off: 850nm), 透過率59%

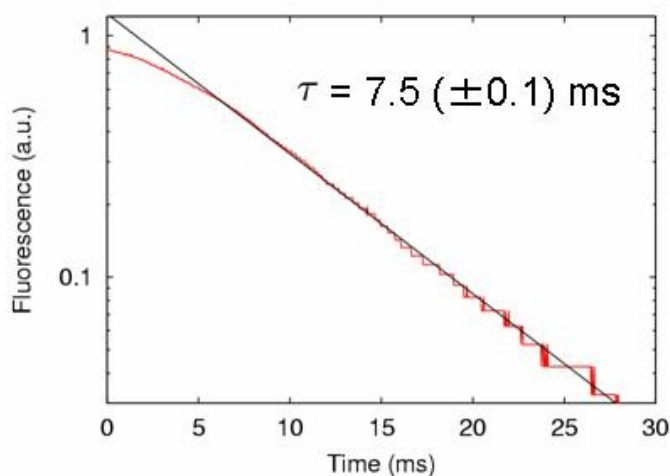
SHG共振器：非線形結晶KNbO<sub>3</sub>, Bow-tieリング共振器, Pound-Drever-Hall法による共振器長制御

# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

## Blue MOTの寿命



Blue MOT のトラップ寿命



準安定状態 $3P_2$ へのDecayによるトラップ寿命

$$\tau = 1.56 \times 10^{-3} \left[ 1 + \frac{1 + 4(\Delta/\Gamma)^2}{I/I_s} \right] \text{ sec}$$

$\Delta$ : 離調 (Hz)  $\Gamma$ :  $1S_0 - 1P_1$ 遷移の自然幅 (Hz)

$I$ : 全MOT光強度 ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

$I_s$ :  $1S_0 - 1P_1$ 遷移の飽和強度 ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

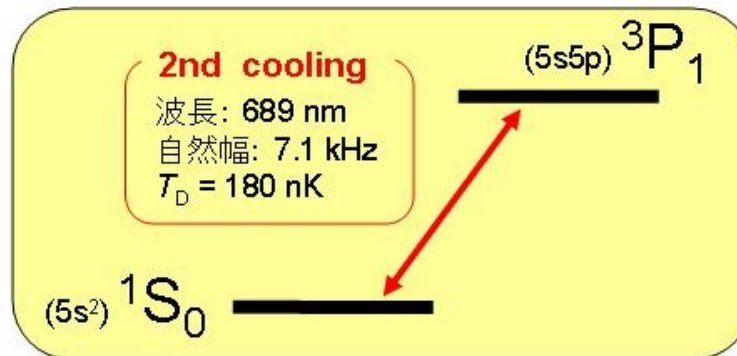
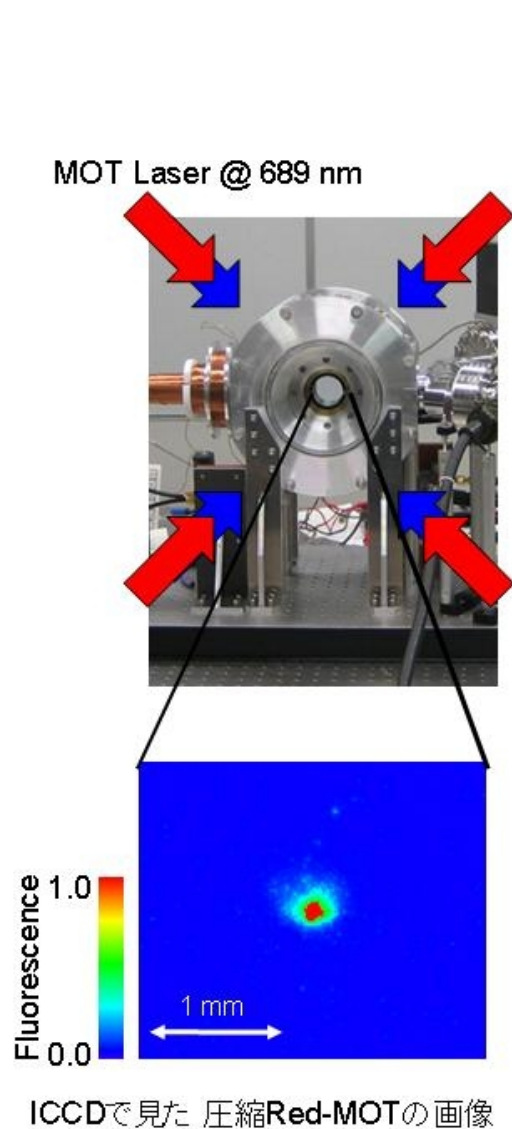
X. Xu *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B 20, 968 (2003)

本実験のパラメータで計算すると  $\tau = 10$  ms。トラップ寿命はほぼ $3P_2$ 状態へのDecayで決まっている

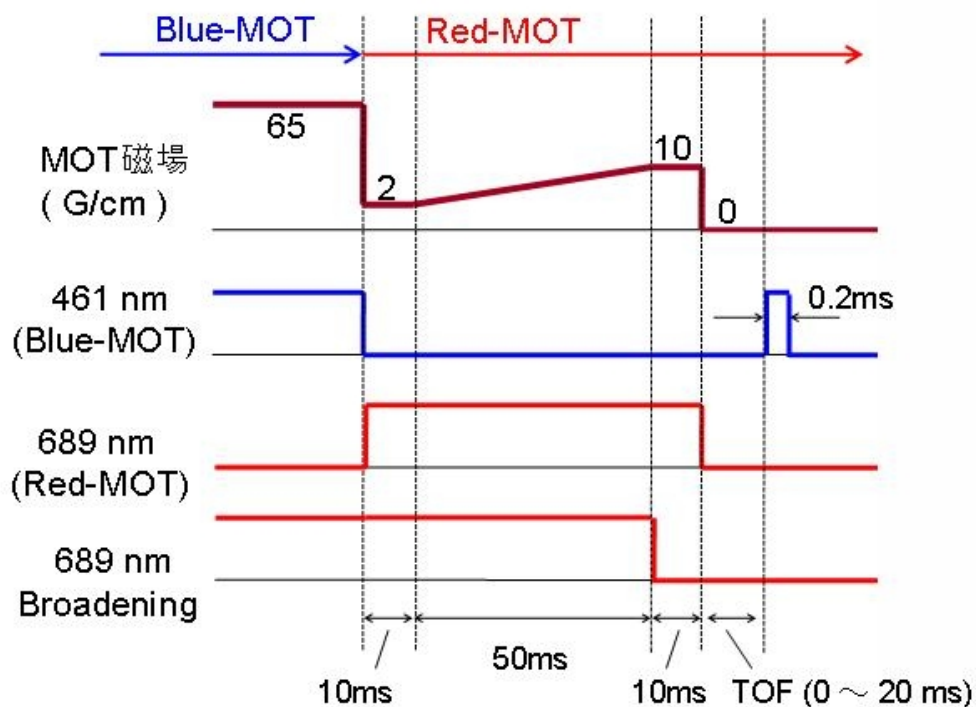
→ リポンプ光により  $3P_2$ 状態の原子を基底状態に戻してくることで改善可能 (今後の予定)

# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

## Red MOTの寿命



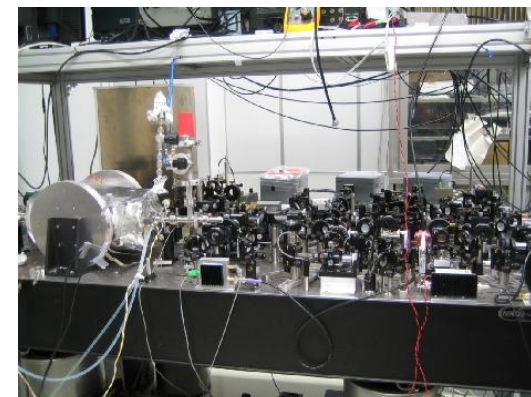
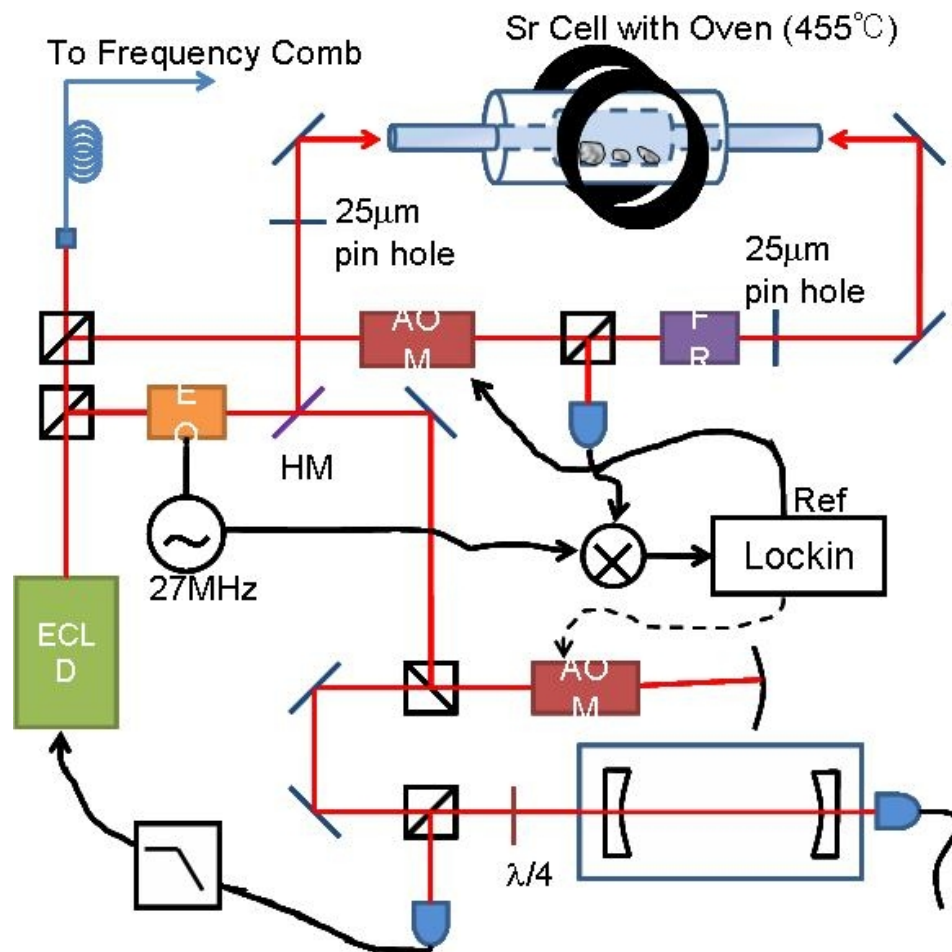
## Red-MOT 生成&観測のタイムチャート



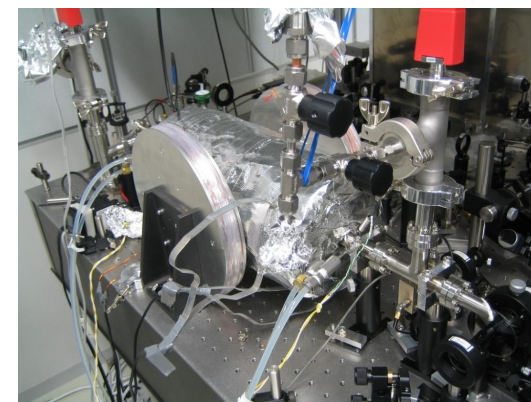


# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

Red MOT用689nm光源



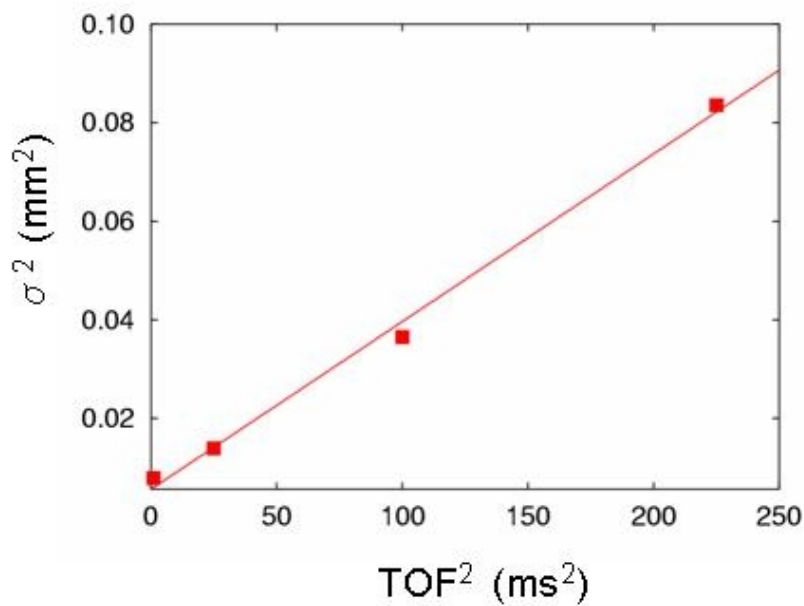
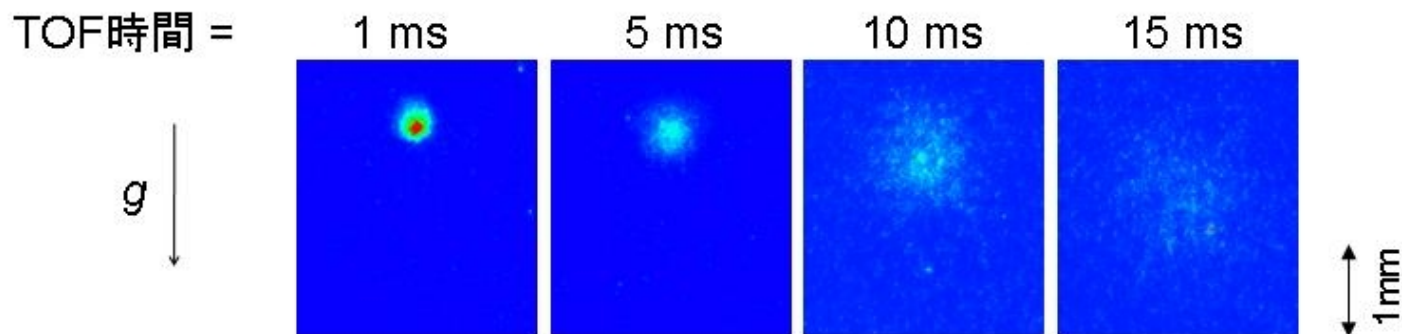
689nm光源全体



Srセル

# $^{87}\text{Sr}$ 光格子時計 (NICT)

TOF(Time-Of-Flight)測定によるRed-MOT温度の測定



原子の広がる速さから温度を見積もる

$$\sigma(t)^2 = \sigma_0^2 + \frac{k_B T}{m} t^2$$

$t$  : TOF時間       $T$  : 原子集団の温度  
 $\sigma(t)$  :  $t$ 後の分布幅       $m$  : 原子の質量  
 $\sigma_0$  : 初期分布幅       $k_B$  : ボルツマン定数

温度:  $3.3 \mu\text{K}$

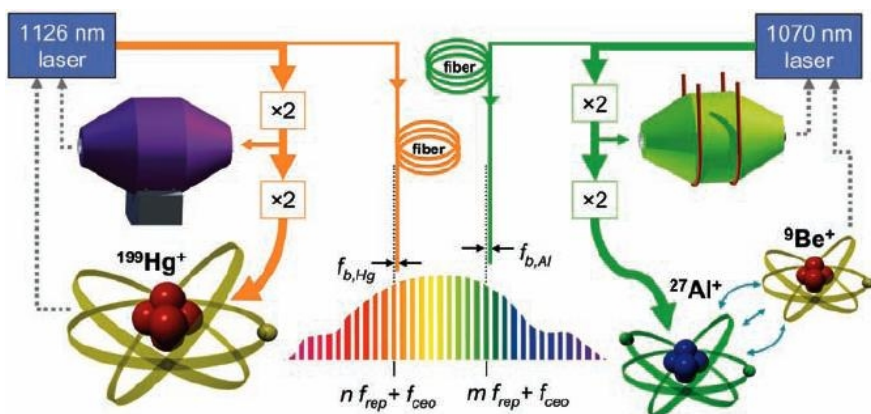
典型的な光格子ポテンシャルの深さは $30 \mu\text{K}$ 。  
光格子にロードするには、すでに十分冷却完了。

# Al<sup>+</sup>とHg<sup>+</sup>単一イオン光時計の周波数比 (NIST)

T. Rosenband et al.,  
Science, v319, p1808, y2008

米国国立標準技術研究所 (NIST)における実験

2台の単一イオン(<sup>27</sup>Al<sup>+</sup>, <sup>199</sup>Hg<sup>+</sup>)光時計の周波数比を少数17桁で比較に成功!!!  $\nu_{Al}/\nu_{Hg} = 1.052871\ 833\ 148\ 990\ 438(55)$



<sup>27</sup>Al<sup>+</sup>イオンは<sup>9</sup>Be<sup>+</sup>イオンとの共同冷却(Sympathetic Cooling)と量子ロジックによる遷移検出利用

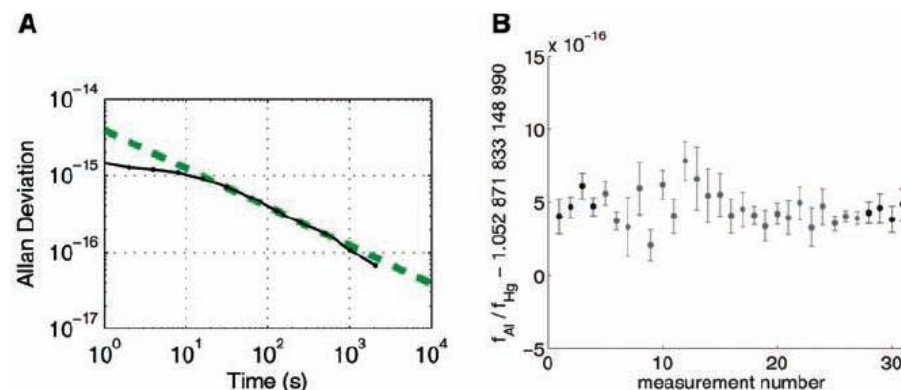


Fig. 2. (A) Allan deviation of a frequency comparison measurement (11,000 s total). The dashed line represents a  $1/\sqrt{t}$  slope, beginning at  $3.9 \times 10^{-15}$  for 1 s. (B) History of frequency ratio measurements of the <sup>199</sup>Hg<sup>+</sup> and <sup>27</sup>Al<sup>+</sup> frequency standards. Error bars are statistical. Only the last four points are used in the ratio reported here (Fig. 3).

Table 1. <sup>27</sup>Al<sup>+</sup> <sup>1</sup>S<sub>0</sub> ↔ <sup>3</sup>P<sub>0</sub> and <sup>199</sup>Hg<sup>+</sup> <sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> → <sup>2</sup>D<sub>5/2</sub> clock shifts ( $\Delta\nu$ ), and uncertainties ( $\sigma$ ) in units of  $10^{-18}$  of fractional frequency. AOM, Acousto-optic modulator.

Shift	$\Delta\nu_{Al}$	$\sigma_{Al}$	$\Delta\nu_{Hg}$	$\sigma_{Hg}$	Limitation
Micromotion	-20	20	-4	4	Static electric fields
Secular motion	-16	8	-3	3	Doppler cooling
Blackbody radiation	-12	5	0	0	DC polarizability
313-nm Stark	-7	2	-	-	Polarizability, intensity
DC quadratic Zeeman	-453	0.5	-1130	5	B-field calibration
AC quadratic Zeeman	0	1	0	10	Trap RF B-fields
Electric quadrupole	0	0.5	0	10	B-field orientation
First-order Doppler	0	1	0	7	Statistical imbalance
Background gas collisions	0	0.5	0	4	Collision model
AOM phase chirp	0	0.1	0	6	RF power
Gravitational red-shift	-5	1	-	-	Clock height
Total	-513	23	-1137	19	

統計的不確かさ(TypeA) :  $4.3 \times 10^{-17}$

周波数比の不確かさ (TypeA + TypeB(Hg+) + TypeB(Al+)) :  $5.2 \times 10^{-17}$

重力赤方偏移シフトの影響がもはや無視できないレベルにあることに注目。

→ 測地学(1cmレベルのジオイド高計測)への応用

異なるイオン種の周波数比は微細構造定数 $\alpha$ に依存する

→ 統一理論の検証

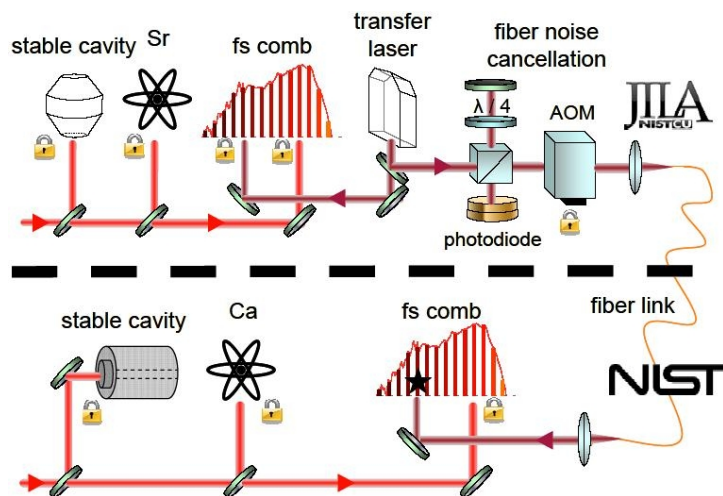
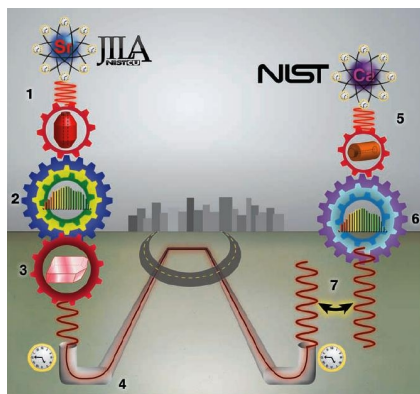
⇒ 量子物理学と相対論、測地学、そして宇宙論が光標準を介して結ばれる

# Sr光格子時計とCa時計の遠隔比較(JILA&NIST)

A.D. Ludlow et al.,  
Science, v319, p1805, y2008

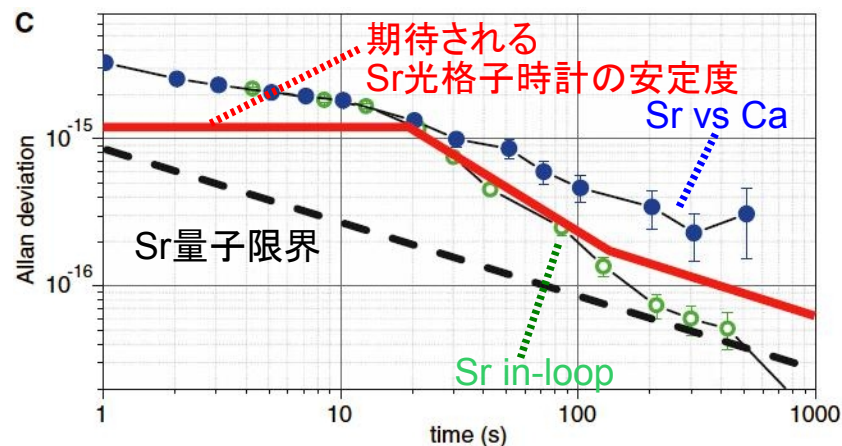
Sr光格子時計(JILA)とCa時計(NIST)を4kmの光ファイバーで結んで周波数安定度比較

また、Sr光格子時計の周波数確度 $1 \times 10^{-16}$ と達成



光周波数コム、ファイバー伝送系の周波数安定度は  
アラン分散 $<10^{-17}$ @1s

Sr光格子時計 vs Ca時計



**Table 1.** Systematic frequency corrections and their associated uncertainties for the  $^1S_0$ - $^3P_0$  clock transition, in units of  $10^{-16}$  fractional frequency.

Contributor	Correction ( $10^{-16}$ )	Uncertainty ( $10^{-16}$ )
Lattice Stark (scalar/tensor)	-6.5	0.5
Hyperpolarizability (lattice)	-0.2	0.2
BBR Stark	52.1	1.0
ac Stark (probe)	0.2	0.1
First-order Zeeman	0.2	0.2
Second-order Zeeman	0.2	0.02
Density	8.9	0.8
Line pulling	0	0.2
Servo error	0	0.5
Second-order Doppler	0	$<<0.01$
Systematic total	54.9	1.5

**黒体輻射シフト対策がSr光格子時計の  
今後の確度向上の決め手  
⇒ ヘリウム温度、BBRチャンバーなど**

# 光周波数標準の将来展望と応用

# 光周波数標準の将来展望

## ●イオントラップ

量子ロジックの手法による量子跳躍の検出と共同冷却の利用 P.O. Schmidt et al., Science, v309, p749, y2005

プラナー型RFトラップによる多数(~100)個イオンの分光

## ●光格子時計

クロックレーザーの短期(1s~100s)安定度向上 → FP共振器の熱雑音対策、Dual atomic reference optical clock  
最終達成確度の確認

周波数確度・安定度 $10^{-18}$ を短時間(数時間~1日以内)に達成することが最終目標

地表のジオイド高変化1cm  $\Leftrightarrow$  重力赤方偏移シフト $1 \times 10^{-18}$

大陸移動 ex.1cm/年  $\Leftrightarrow$  ドップラーシフト $1 \times 10^{-18}$

→ 地球上は、もはや良い基準座標系になりえない。→ 宇宙へ

可搬型光時計と光ファイバー伝送技術

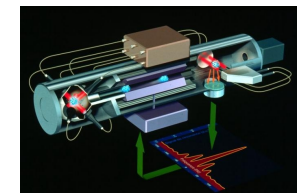
基準光時計との比較で、1cm精度でジオイド計測が可能になり、空間分解能の高いジオイドマップを作れる。

→ 衛星重力ミッションを凌駕。

可搬型光時計の候補  $\Rightarrow$  全固体光時計



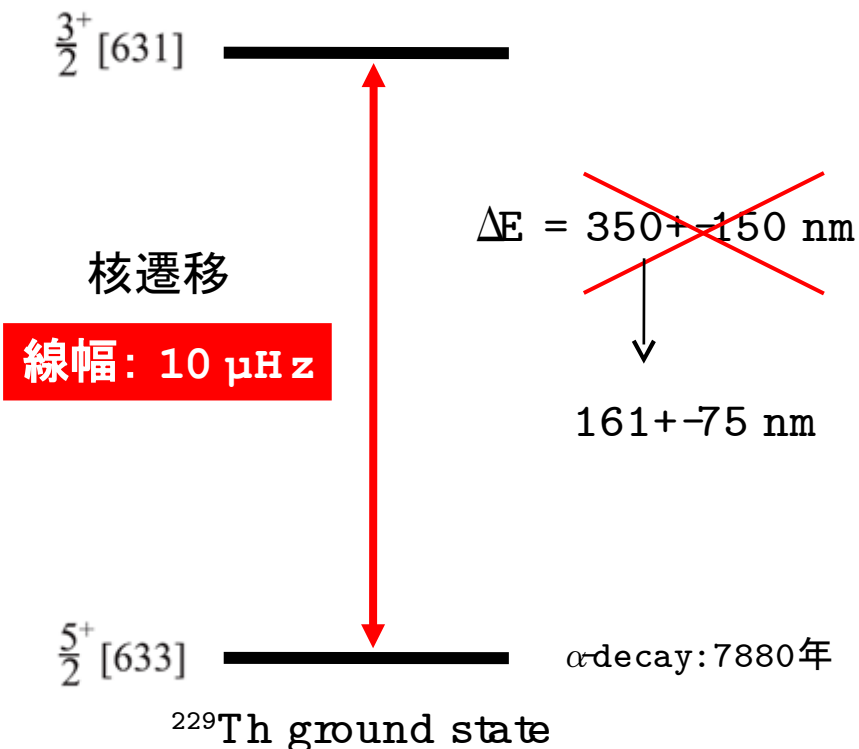
国際宇宙ステーション



宇宙原子泉型標準器(PHARAO)

# $^{229}\text{Th}$ の核遷移を使った全固体原子時計

Thorium (Th) 原子番号90



## 実用面から利点

- ・ 外場(磁場・電場)の影響を非常に受けにくい
- ・ 反跳シフト・衝突シフトをほとんど受けない
- ・ 個体中でよいので、真空チャンバーがいらない  
→ 世の中や宇宙空間に広めるには  
全固体化は決定的に有利
- ・ 紫外領域のため、確度・安定度の向上が見込める  
(そもそも紫外光源の開発自体がチャレンジング。  
半導体産業や超長距離宇宙通信への貢献できる)

## サイエンスの側面からみた利点

- ・  $\alpha$ の時間変化に対する感度が、現状より  
 $10^3 \sim 10^5$ 倍程度上がる
- \* 2つのグループが $^{229}\text{Th}$ を使った実験に着手  
Kuzmich (@Georgia Tech.) イオントラップ  
DeMille (@Yale Univ.) 固体中

E. Peik, et al., Europhys. Lett. 61, 181 (2003)  
B. R. Beck, et al., Phys. Rev. Lett. 98, 142501 (2007)

Atomic Clocks MO28 Poster Session I: Monday, July 28

Investigation of the optical transition in the  $^{229}\text{Th}$  nucleus:  
Solid-state optical frequency standard and fundamental  
constant variation

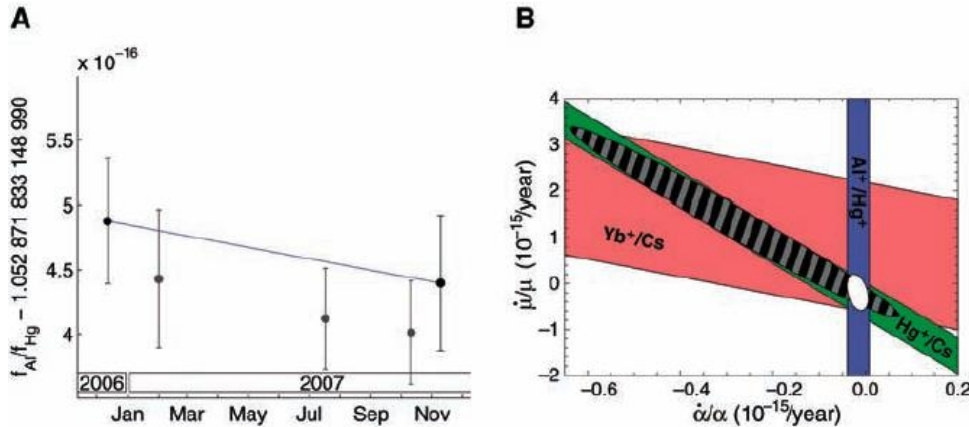
Eric R. Hudson, A. C. Vutha, S. K. Lamoreaux, D. DeMille

Department of Physics, Yale University, 217 Prospect Street, New Haven, CT 06511, USA

# 基礎物理`定数"の変化

物理定数は時間的に、または異なる重力ポテンシャルで本当に一定なのか？

異なる原子種の時計遷移周波数比から微細構造定数 $\alpha$ の時間変化を高精度にモニターすることができる



$$\dot{\alpha}/\alpha = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17} / \text{year}$$

T. Rosenband et al., Science, v319, p1808, y2008

**Table 2.** Some of the precise recent measurements testing the relative changes of the fine-structure constant  $\alpha$  over a time interval  $(t_2 - t_1)$  where  $t_2$  is the present time and  $t_1$  corresponds to the past. The drift can be calculated as  $\partial/\partial t(\ln \alpha) \simeq [\alpha(t_2) - \alpha(t_1)] \alpha^{-1} (t_2 - t_1)^{-1}$ . Combining the results of absolute frequency measurements of the optical transitions in  $\text{Hg}^+$  and H yields a restriction for the drift of  $\alpha$  without assumptions of conceivable correlations between the constants.

Method, reference	$t_2 - t_1$	$ \alpha(t_1) - \alpha(t_2) /\alpha$	Model assumptions
Geological (Oklo reactor) [10]	2 Gyr	$(-0.36 \pm 1.44) \times 10^{-8}$	fission conditions, $\dot{\alpha}_S = \dot{\alpha}_W = 0$
Astrophysical (absorption spectra) [5]	5–11 Gyr	$(-0.54 \pm 0.12) \times 10^{-5}$	astrophysical models
Astrophysical (absorption spectra) [8]	9.7 Gyr	$(-0.06 \pm 0.06) \times 10^{-5}$	astrophysical models
Astrophysical (absorption spectra) [9]	8 Gyr	$(0.1 \pm 1.7) \times 10^{-5}$	astrophysical models
Laboratory (Rb–Cs clocks comparison) [13]	4 yr	$(0.2 \pm 5.2) \times 10^{-15}$	$\dot{\alpha}_S = \dot{\alpha}_W = 0$
Laboratory ( $\text{Hg}^+$ transition frequency measurement) [12]	3 yr	$(-0.1 \pm 3.5) \times 10^{-15}$	$\dot{\alpha}_S = \dot{\alpha}_W = 0$
Laboratory (H transition frequency measurement) [this work]	3.6 yr	$(-4.1 \pm 8.2) \times 10^{-15}$	$\dot{\alpha}_S = \dot{\alpha}_W = 0$
Combination of [12] and this work	3.5 yr	$(3.2 \pm 10.2) \times 10^{-15}$	LLI, LPI, linear drifts

S. G. Karshenboim and E. Peik (Eds.), "Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants", Springer (2004)

分子時計を使えば、陽子と電子の質量比の時間変化を観測できる  
 実用面では赤外(1.5 $\mu\text{m}$ 帯)の標準の可能性  
 ただし、冷却サイクルが閉じないため、今のところ分子を十分低温にできていないのが問題。



# 光周波数コム的发展

1999~ モード同期Ti:サファイアレーザー (プリズムペアによる群速度分散補償)+ 非線形ファイバー D. J. Jones, Science, v288, p635 (2000)

2001~ チャープミラーと広帯域光周波数コム R. Ell et al., Opt. Lett. v26, p373 (2001).  
A. Bartels et al., Opt. Lett. v27, p1839 (2002).

~10fsパルス幅、1オクターブ、コンパクト、高frep、高SNRヘテロダイン計測  
要メンテナンス、可搬性難、高価格

2003~ ファイバーモード同期レーザー光コム, Er添加(1550nm), Yb添加(1030nm)

赤外域、通信波長帯、長期運転、小型、安価

位相ノイズの問題 → 多大な努力により解決しつつある J.J. McFerran et al., Appl. Phys. B86, 219 (2007)

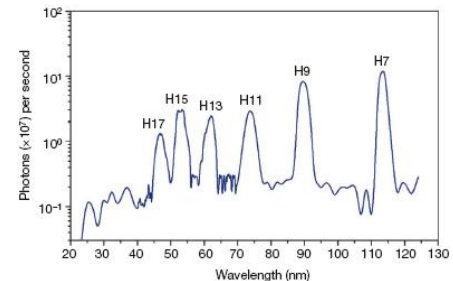
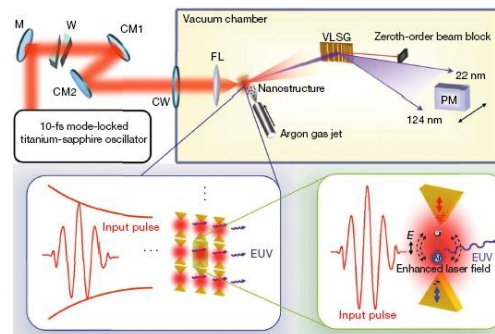
2007 モノリシックマイクロ共振器光コム → CWレーザーからの発生の可能性  
P. Del'Haye et al., Nature, v450, p1214, y2007  
P. Del'Haye et al., PRL, v101, p053903, y2008

\* 将来的には量子ドット半導体レーザーから直接発生?

2005~ 短波長へのアプローチ → 紫外・X線光コム

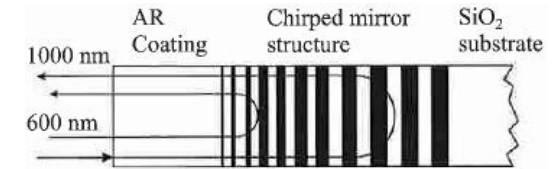
- ・希ガスを使った高次高調波発生
- ・Enhancement cavityから  
金属ナノ構造による  
共鳴プラズモンの利用へ

S. Kim et al., Nature, v453, p757, y2008

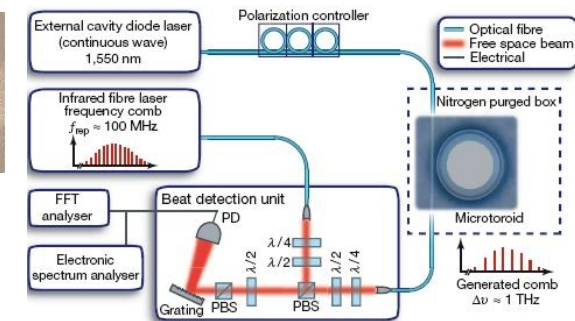
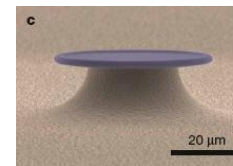


長波長へのアプローチ → THz光コム

安心・安全の観点から標準化への強い要望



F.X. Keartner et al., Opt.Lett. v22, p831, y1997



# まとめ

# まとめ

---

光周波数標準は $10^{-18}$ レベルの確度・安定度を目指して、猛烈な勢いで向上中

これは1秒狂うのに宇宙年齢(127億年)に匹敵する時間が必要な人類が手にする究極の時計を構築することである。

今後は、その究極の性能や要素技術を活かせる様々な応用が出てくることを期待したい