

9月25日13:30—
仁科記念棟、仁科ホール

光格子時計が拓く新たな 時間計測

東京大学大学院工学系研究科
ERATO 創造時空間プロジェクト、科学技術振興機構
理化学研究所 量子計測研究室
香取秀俊

Quantum Metrology (量子計測)

Study of measurement at quantum limited performance



Time / Frequency

Currently, NOT on temperature, weight, (voltage),... lack of quantum references



NOT limited by technical noises:

- Noise from electronics circuit, detectors, ...
- Thermal noise

Time/frequency measurement is NOT limited by frequency counters but is **limited by the quantum system itself (and their design)**.

Electron shelving technique

- 1原子の電子状態を量子効率100%で観測する
- Quantum Metrologyのエッセンス！
- これに代わる手法をぜひ見つけたい！

VOLUME 56, NUMBER 26

PHYSICAL REVIEW LETTERS

30 JUNE 1986

Shelved Optical Electron Amplifier: Observation of Quantum Jumps

Warren Nagourney, Jon Sandberg, and Hans Dehmelt

Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195

(Received 5 May 1986)

We demonstrate here the direct observation of quantum jumps between the $6^2S_{1/2}$ state and the $5^2D_{5/2}$ state of an individual laser-cooled Ba^+ ion contained in a radio-frequency trap. The state detection and cooling are performed by two lasers which cause $6^2S_{1/2}$ - $6^2P_{1/2}$ - $5^2D_{3/2}$ transitions. Incoherent excitation to the $5^2D_{5/2}$ state (via the $6^2P_{3/2}$ level) causes the fluorescence from the $6^2P_{1/2}$ state to be suppressed for the > 30 -sec lifetime of that state, after which the fluorescence reappears. The resulting "telegraph signal" provides a direct monitor of the atomic state.

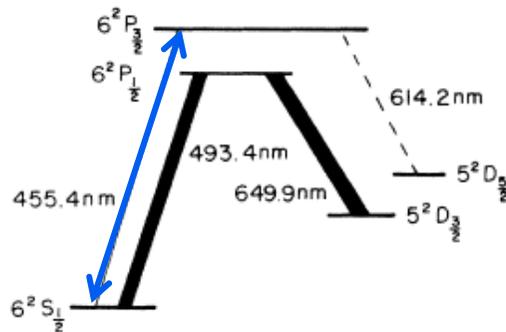


FIG. 1. Level structure of Ba^+ . The shelf level is the $5^2D_{5/2}$ state. The laser excitation is shown by the bold lines; the lamp excitation is indicated by the light solid line while the subsequent decay into the shelf level is indicated by the dashed line.

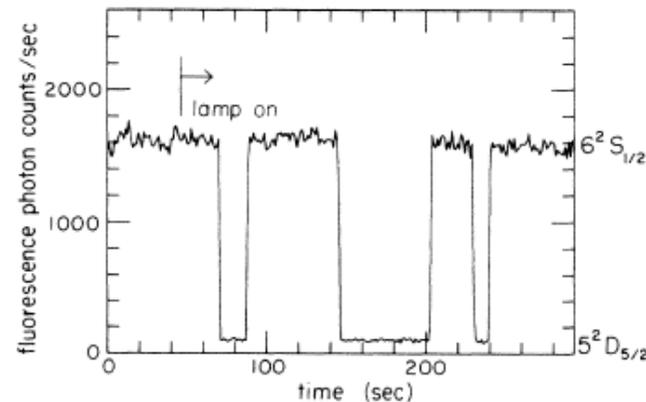
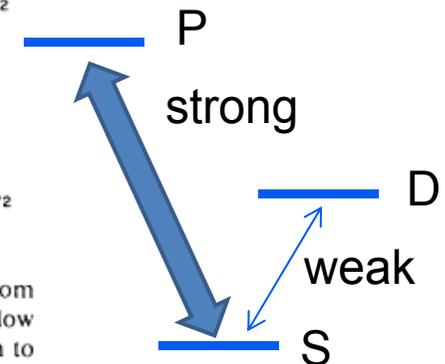


FIG. 2. A typical trace of the 493-nm fluorescence from the $6^2P_{1/2}$ level showing the quantum jumps after the hollow cathode lamp is turned on. The atom is definitely known to be in the shelf level during the low fluorescence periods.

双極子遷移の典型的な光子散乱レートは $10^8/s$ 、検出の立体角を 10^{-4} としても10個/msの光子を計測可能。検出器の量子効率PMT $>10\%$ 、PD $\sim 50-99\%$

$$\Psi = c_1|S\rangle + c_2|D\rangle$$



精密計測の鉄則:

「測定値を時間・周波数の測定に置き換えること」

時間・周波数は物理計測の中で最も正確に計測可能な物理量

- 1秒の定義の精度: 15桁、国際原子時
- 長さ計測; 光速度一定、時間計測へ
- 電圧計測; ジョセフソン効果、周波数計測へ
 - $K_J = 2e / h = 483597.9(\text{GHz/V})$; ジョセフソン定数
- 光格子時計のアイディア
 - 摂動を与えるプロトコルを周波数で定義する

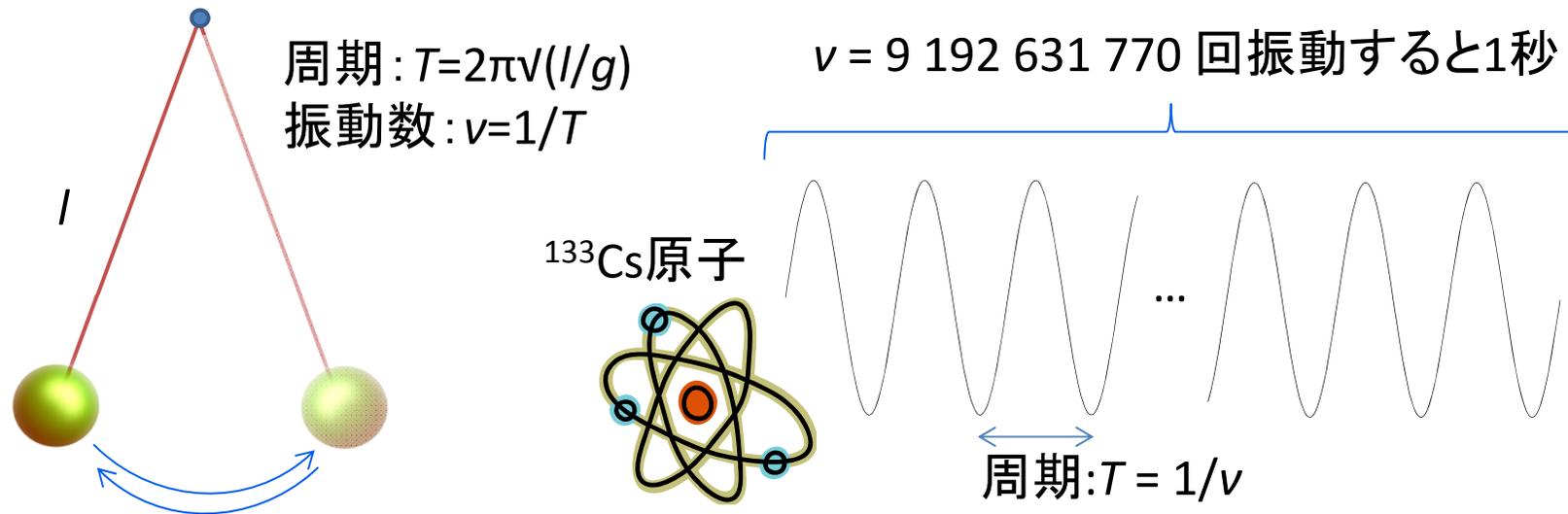
内容

- 原子時計の実現: 2状態間のエネルギー差を正確に測る
- 原子時計の安定度は量子射影ノイズで原理的に制限される
- 光格子時計の発明、「魔法波長」の発見
- 量子限界で動作する光格子時計の実現
- (原子時計の)時間比較でわかること
- いま進めている研究(おまけ程度・さらっと)

原子時計研究はなぜ面白い？

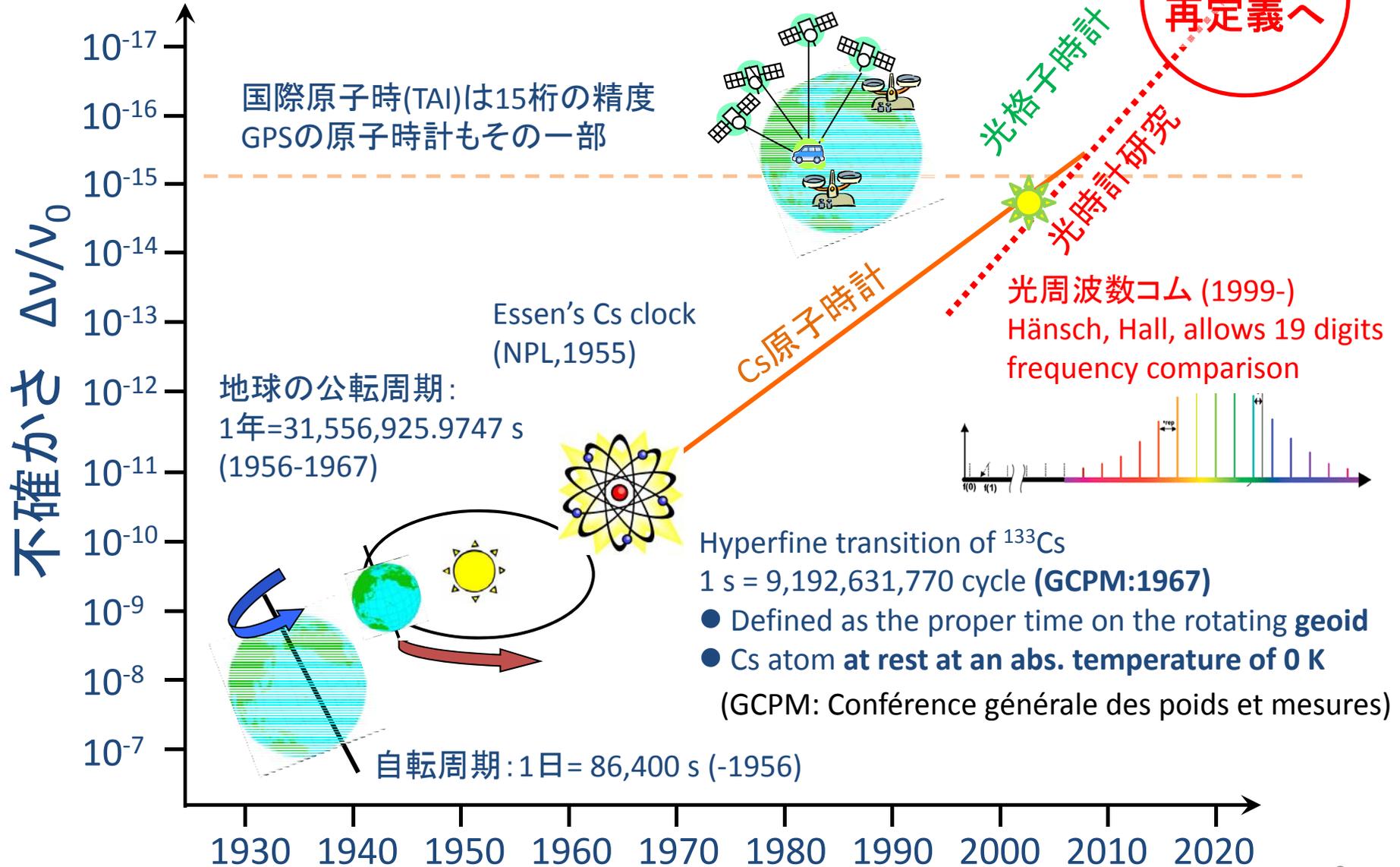
- 原子時計の精度
 - 科学計測の中で桁違いの精度を誇る
 - 精密計測・原子分光技術のベンチマークテスト
 - スーパーカー、スパコン、スーパーコライダー、...、**スパクロ**...
- 量子のルールだけで性能を競う(測定器の雑音を混入させない工夫) – Electron shelving –
- 極限的な精度で物理の根幹に迫る
- 工学的にもきっと役立つ
 - GPS、電波時計、高速ネットワーク同期...
 - 新しい工学ニーズの発掘: 50年前にGPSのカーナビ応用を考えるような斬新な発想が必要

どうやって時間を認識するか？



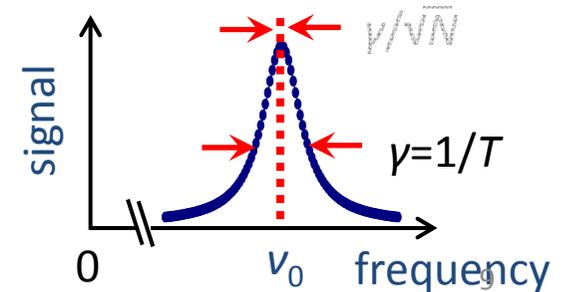
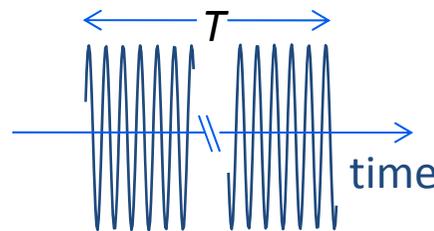
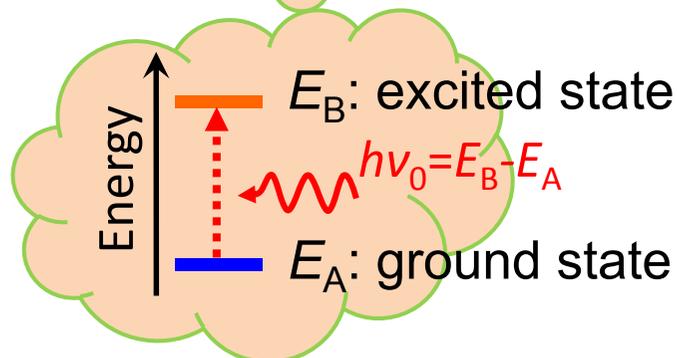
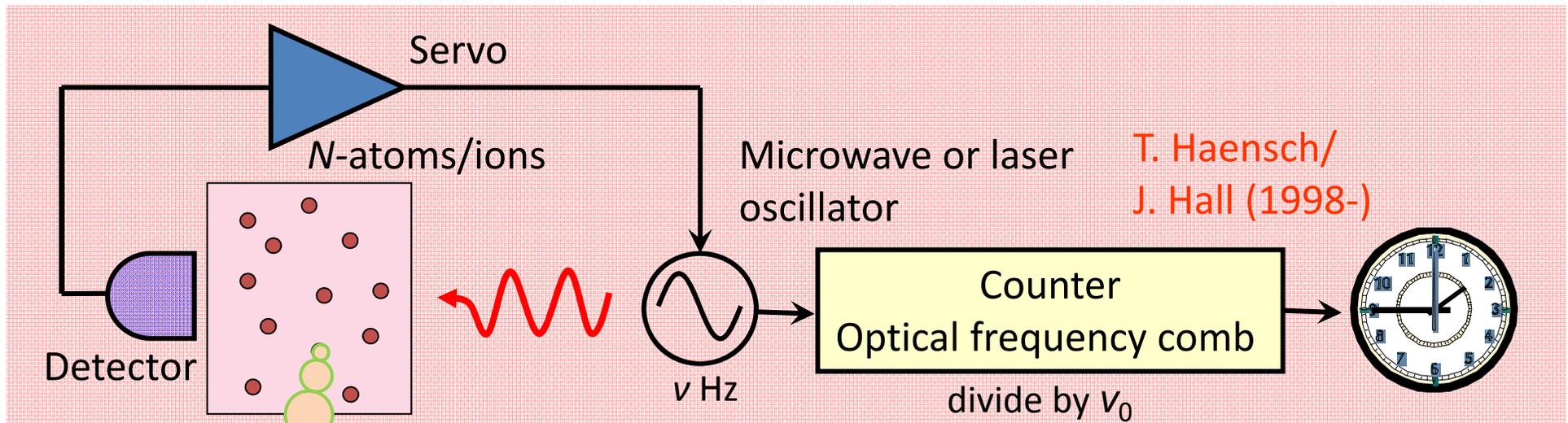
- 周期 T の現象を見出す: 地球の自転、振り子、原子の振動...
- 繰り返しの回数 n を数える: 経過時間 $t=n\cdot T=n/\nu$
- 周期が δT 揺らぐと、経過時間も $\delta t=n\cdot\delta T$ だけ狂う
→ 時計の精度: $\delta t/t = \delta T/T = \delta\nu/\nu$
- 時計精度 $\delta t/t$ は、振り子の周波数精度 $\delta\nu/\nu$ で読み替える
- $\delta t/t=1$ 秒/300億年、なら $\delta\nu/\nu=\delta t/t=10^{-18}$ が必要
→ 18桁の時計・分光精度を目指す

1秒の定義の変遷



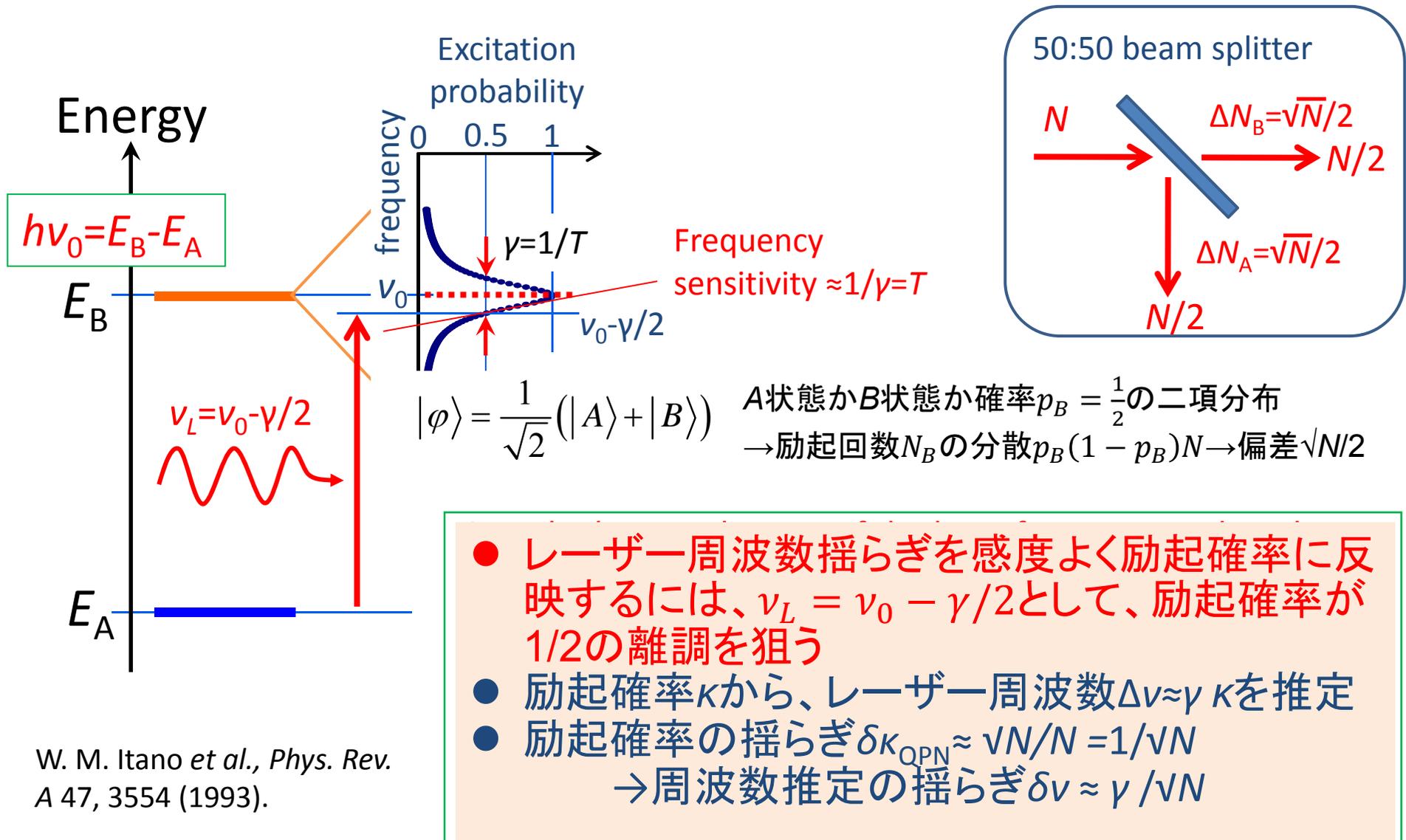
Building Atomic Clocks

- **Believe in the constancy of fundamental constant. (Is this true?)**
- Measure local oscillator frequency referencing the atomic transition
 - Excitation linewidth $\gamma \approx 1/T$ (Fourier limit for T interaction)
 - Data averaging for better statistics with N atoms
 - Uncertainty in frequency estimation (QPN): $\langle \delta\nu \rangle = \langle \Delta N \rangle / |d(Np_B)/d\nu| \leq \frac{1}{T\sqrt{N}}$
- Servo control of flywheel oscillator (laser)



量子揺らぎとの戦い

原子によるレーザー周波数の最善の測定



いい原子時計を作る戦略

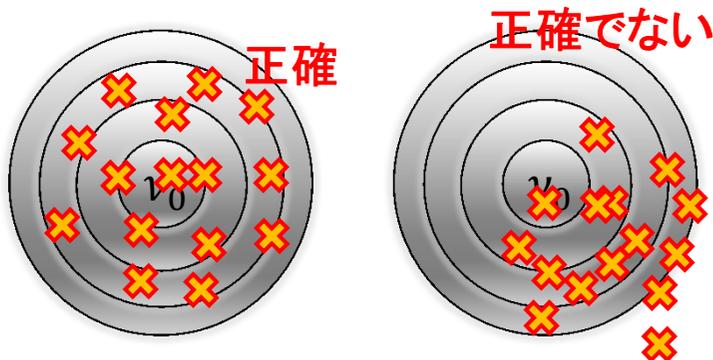
原子の振りの相対的な周波数揺らぎ $\Delta\nu/\nu_0$ が指標

→ 測定の不確かさ $\Delta\nu \approx 10^{-3} \sim 10^{-5}$ が同程度なら、周波数 ν_0 が高いほど有利。

光原子時計 ($\nu_0 \approx 10^{15}$ Hz) はマイクロ波のCs時計 ($\nu_0 \approx 10^{10}$ Hz) より圧倒的に有利。ただし、ドップラー効果 $\nu_D = \frac{u}{c}\nu_0$ は例外！ → ラムディック束縛が重要

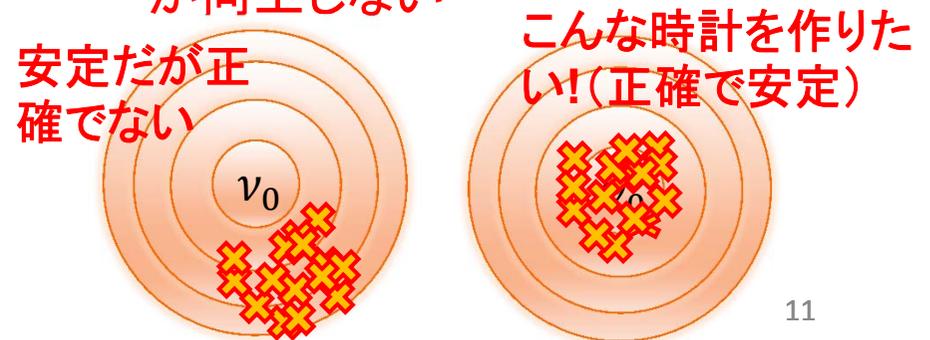
正確さ (Accuracy)

- 原子固有の遷移周波数からのずれの小ささ (ドップラー・シフト、電磁場の影響をなくす...)
- 原子時計の設計 = 電磁場がゼロの環境整備



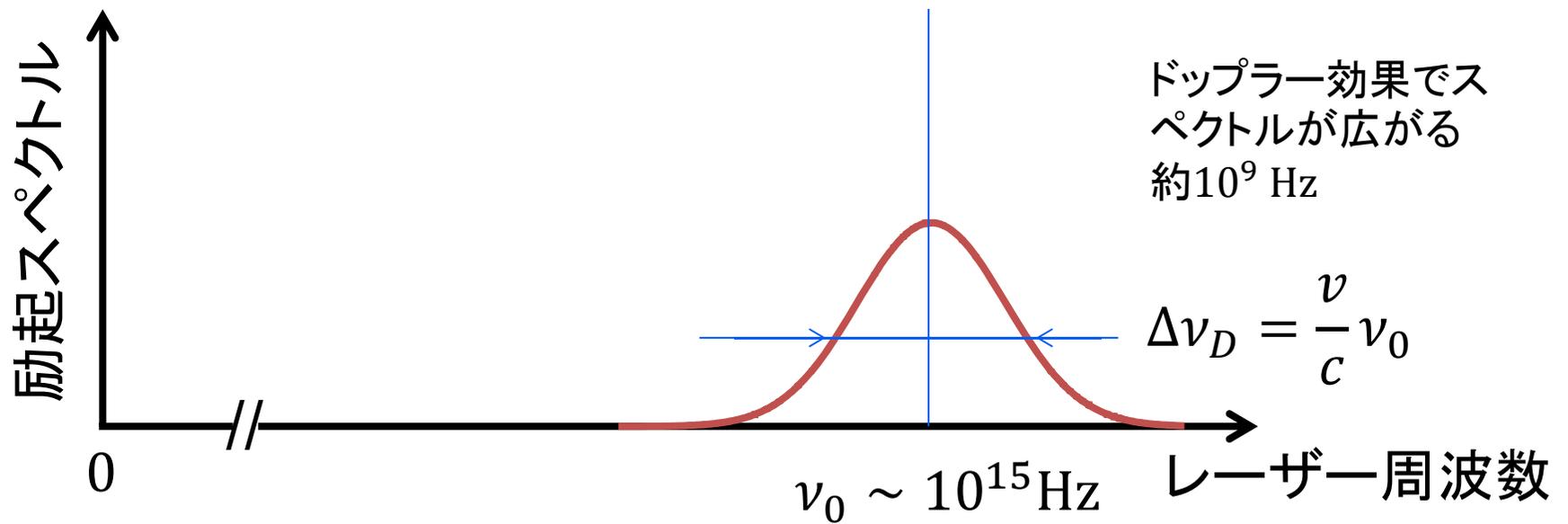
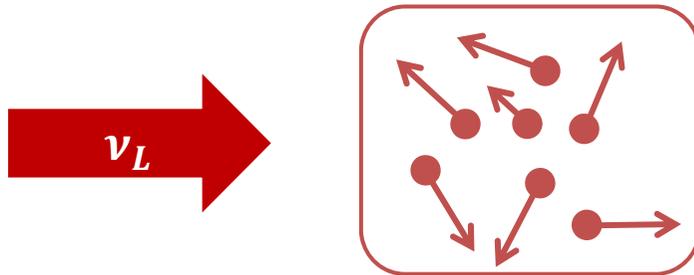
安定度 (Stability)

- どれだけ早く、ターゲットに収束できるか？
- 量子雑音が分光精度 $\delta\nu = \gamma/\sqrt{N}$ を制限
- 原子時計の安定度: $\delta\nu/\nu_0 \approx (\gamma/\sqrt{N})/\nu_0$
 - 延べ測定原子数 N の平方根でしか向上しない

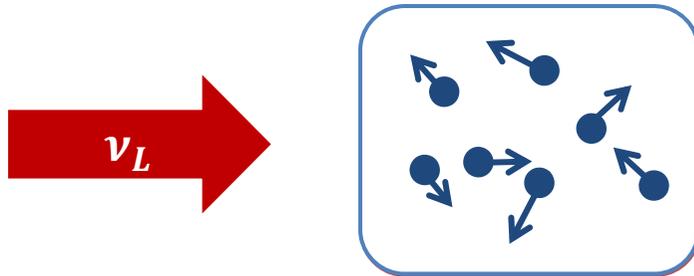


原子のスペクトル

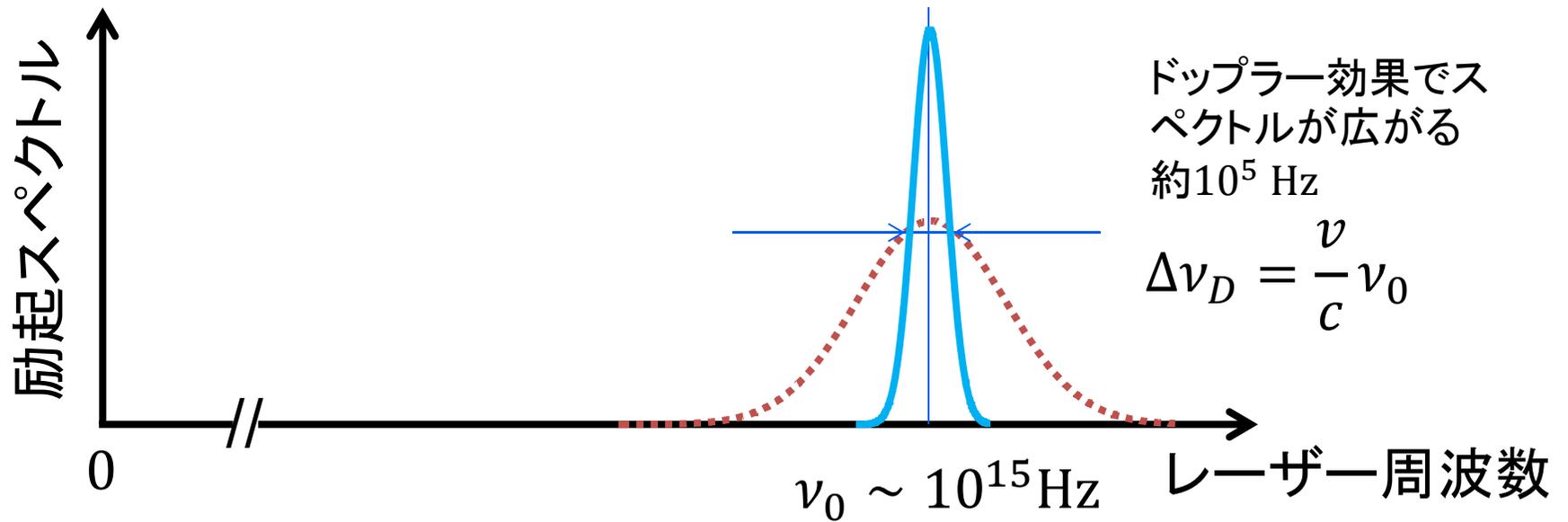
原子が室温(300K)のとき



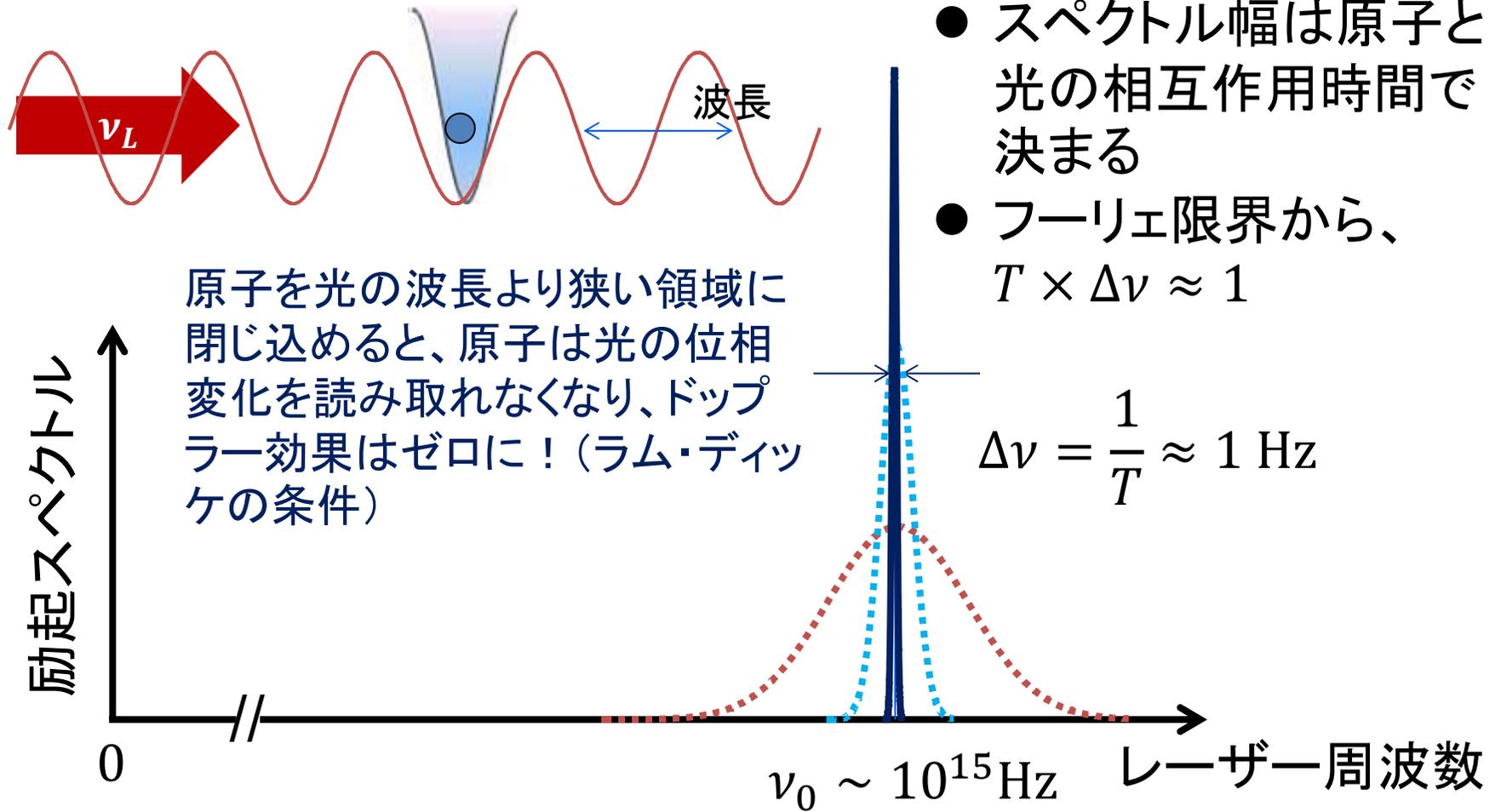
原子のスペクトル



原子を冷却(10^{-5}K)すると
ドップラー効果が小さくなる



原子のスペクトル



メスバウワー分光と同じ条件を作り出している

「正確さ」の観点ではポールトラップ中の単一イオンが理想的

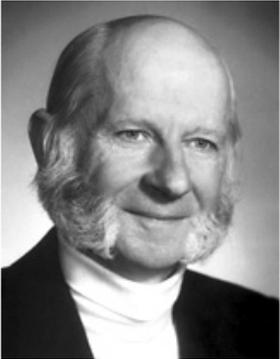
For decades, singly trapped-ions (atoms) in **Paul** traps (“50-) have been considered to be the prime candidate for future optical atomic clocks as proposed by **Dehmelt** and others (“82)

 The Nobel Prize in Physics 1989

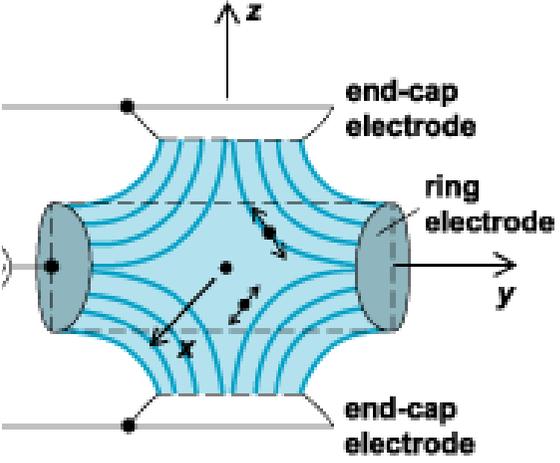
"for the invention of the separated
electric field, therefore the minimized perturbation promises
clock accuracy $\Delta\nu/\nu_0 \approx 10^{-18}$, however **the stability is limited.**

"for the development of the ion trap technique"

 Norman F. Ramsey

 Hans G. Dehmelt

 Wolfgang Paul



near the zero of the trapping

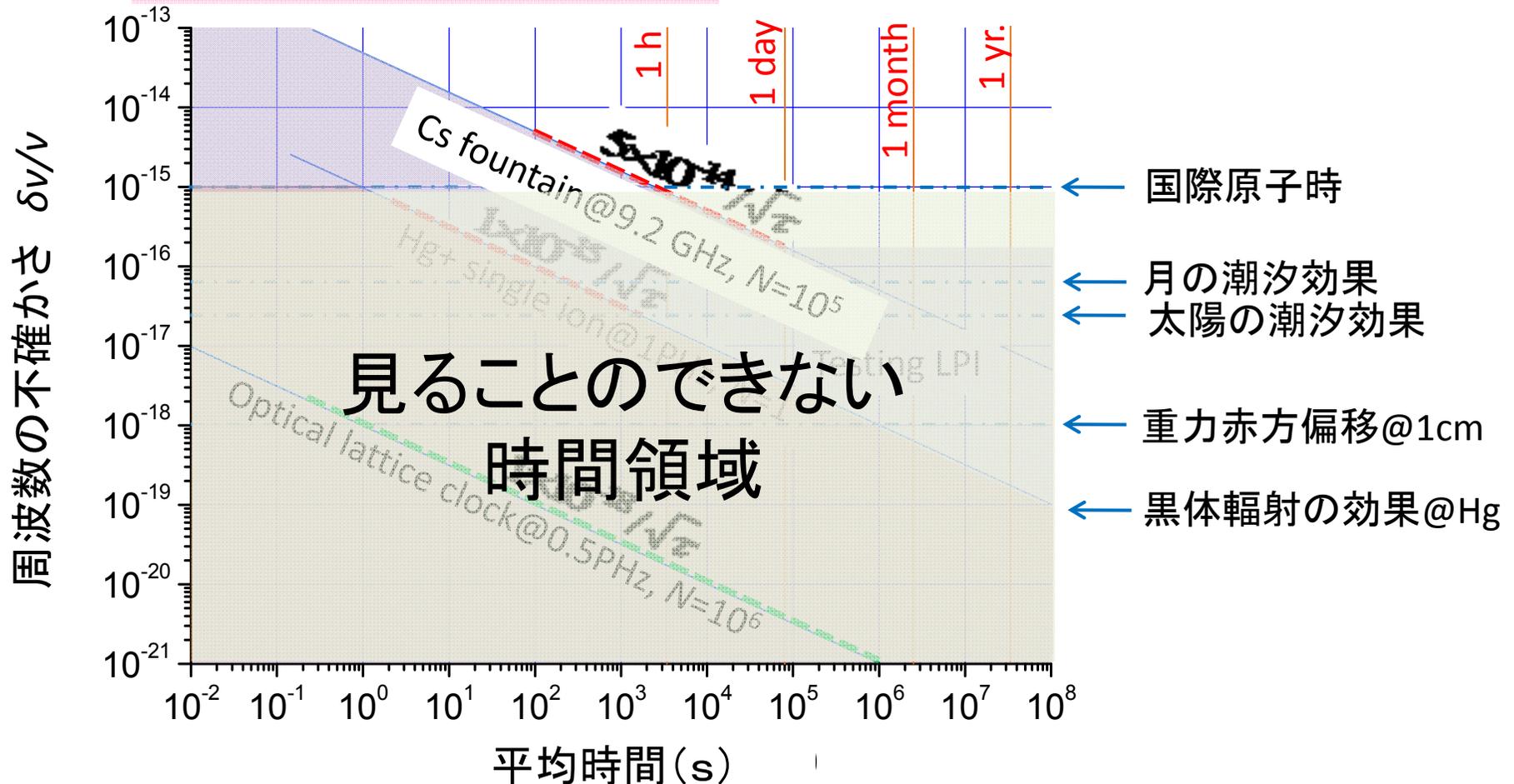
Al⁺ ion optical clock with uncertainty of 7.0×10^{-18} (NIST group 2009.12)

見えなかった時間領域に光をあてる！

原子時計の安定度の量子限界

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{\gamma}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{\gamma}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{n\tau}}$$

n : Observed atoms/s
 τ : Averaging time



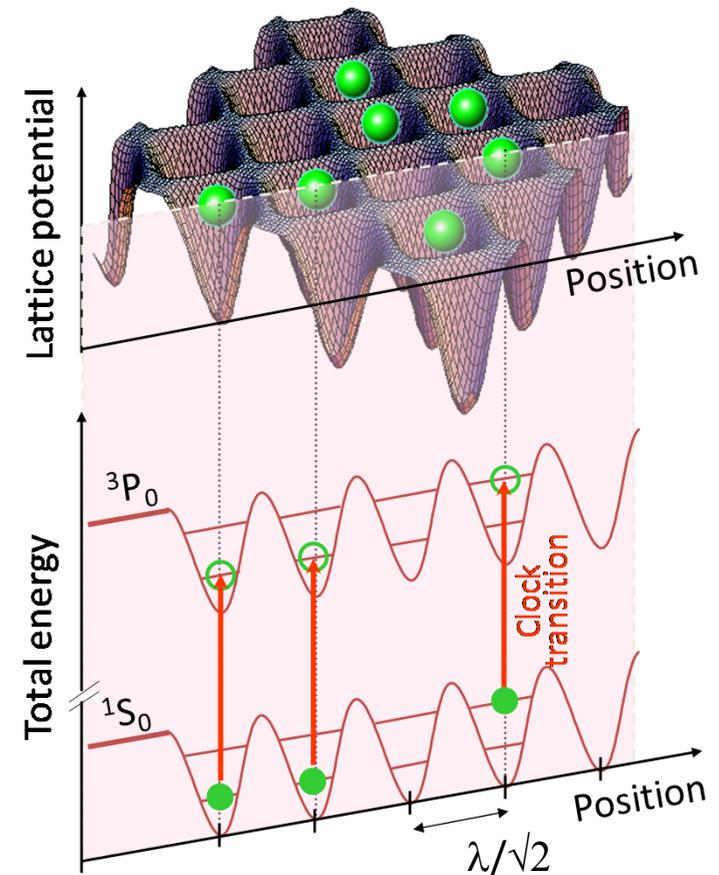
発想の転換：電磁場のエンジニアリング

- 伝統的な摂動除去の原則
 - 単一イオン時計の量子限界に到達
 - エンジニアリングした電磁場を印加して、正確で安定な時計を目指す
 - 格子の振動基底状態に原子を凍結
 - 電磁場の影響を1桁制御可能か？
 - “光格子時計”の概念の提案
- Katori 2001・FMS: 魔法波長のレーザーで原子をトラップすると、原子には摂動が見えない

100万個の極低温原子を、レーザー光の干渉縞によってできる光格子に束縛

⇒原子間相互作用を排除：単一原子時計100万台と等価

強い電磁場を加えながら、正確な時計が作れるのか？
半世紀の原子時計の歴史への挑戦！



Manipulation of atomic motion by lasers

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997 Nobel Prize)

1) Laser Cooling:

Atom's momentum is controlled by photons' momenta

→ cool atoms down to $\sim \mu\text{K}$ and below



2) Optical dipole trap:

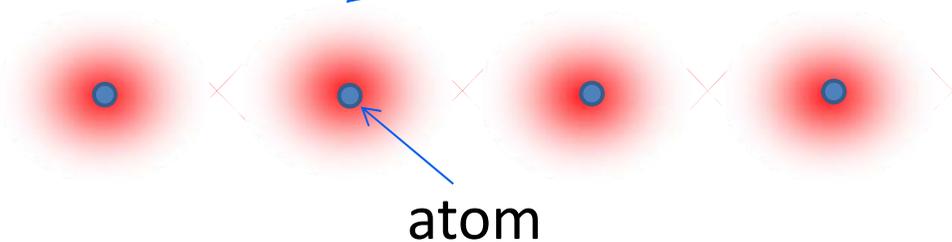
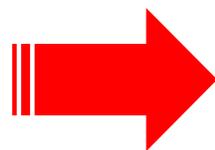
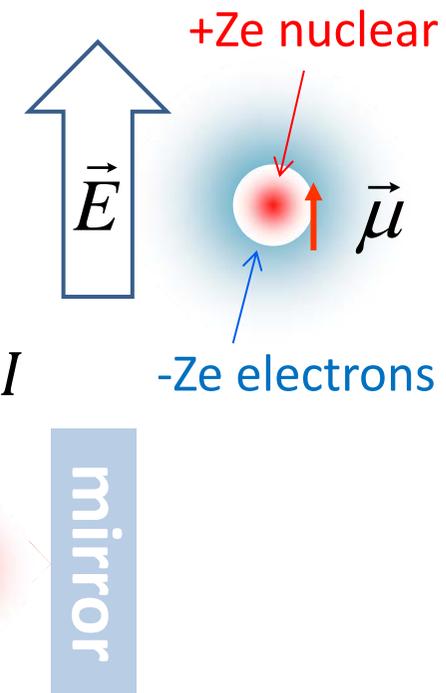
Applying electric field, atoms are polarized.

—Induced dipole moment: $\vec{\mu} = \alpha(\omega)\vec{E}(\omega)$

—Light shift (depends on light frequency):

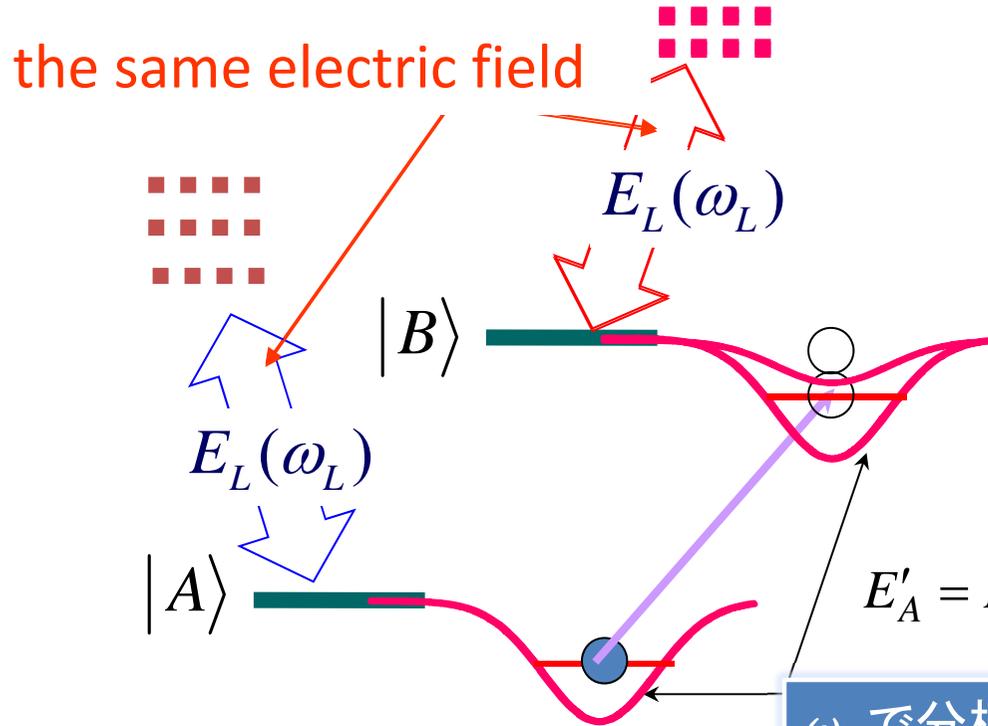
$$U = - \int \vec{\mu} \cdot d\vec{E} = - \frac{1}{2} \alpha(\omega) |\vec{E}(\omega)|^2 \propto -\alpha I$$

↙ antinode



In standing wave, cold atoms are trapped in anti-nodes, where the light intensity is maximum: **OPTICAL LATTICE** “array of atoms”

光双極子トラップで加わる光シフトを取り除く



Katori, Ido, & Gonokami, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68**, 2479 (1999)
 FORT for Rb C-QED experiment: J. McKeever *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 133602 (2003).

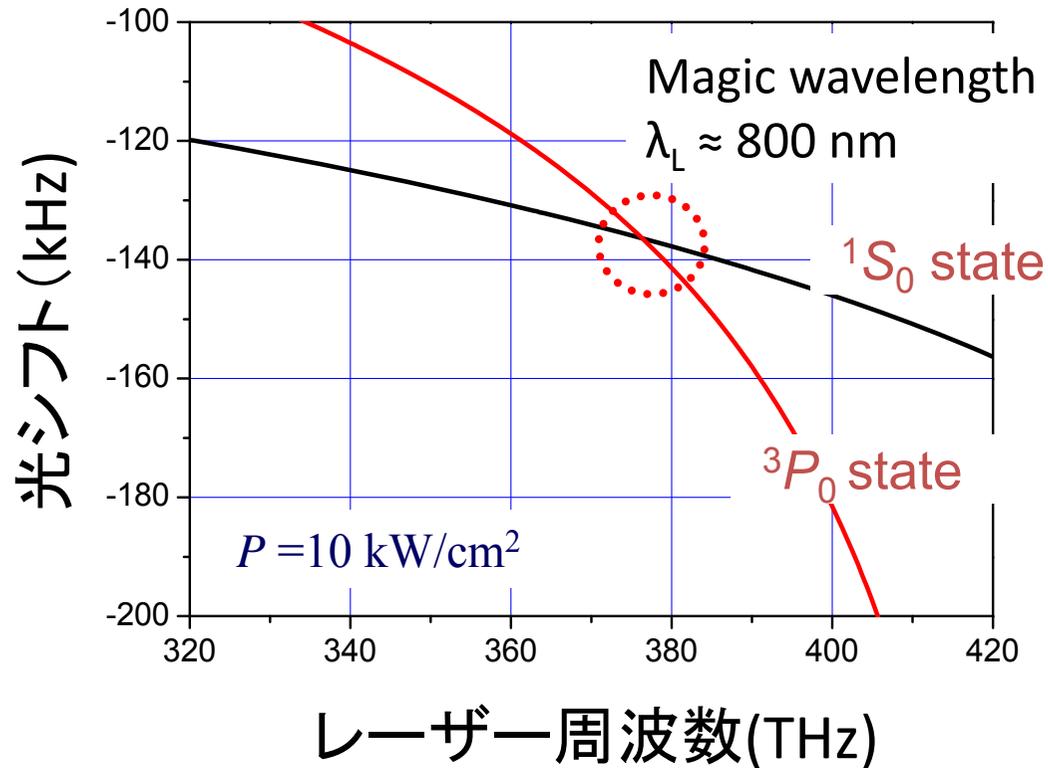
$$E'_B = E_B - \frac{1}{2} \alpha_B(\omega_L) |E_L(\mathbf{r}, \omega_L)|^2$$

$$E'_A = E_A - \frac{1}{2} \alpha_A(\omega_L) |E_L(\mathbf{r}, \omega_L)|^2$$

ω_L で分極率 $\alpha(\omega_L)$ をチューニングして、同じ深さの容器に原子を入れれば、容器の影響が相殺されて、原子固有の周波数が測れる。
 →魔法周波数

$$h\nu = (E_B - E_A) \frac{\{\alpha_B(\omega_L) - \alpha_A(\omega_L)\}}{2} |E_L(\omega_L)|^2 + O(E^4)$$

光シフトを打ち消す魔法周波数

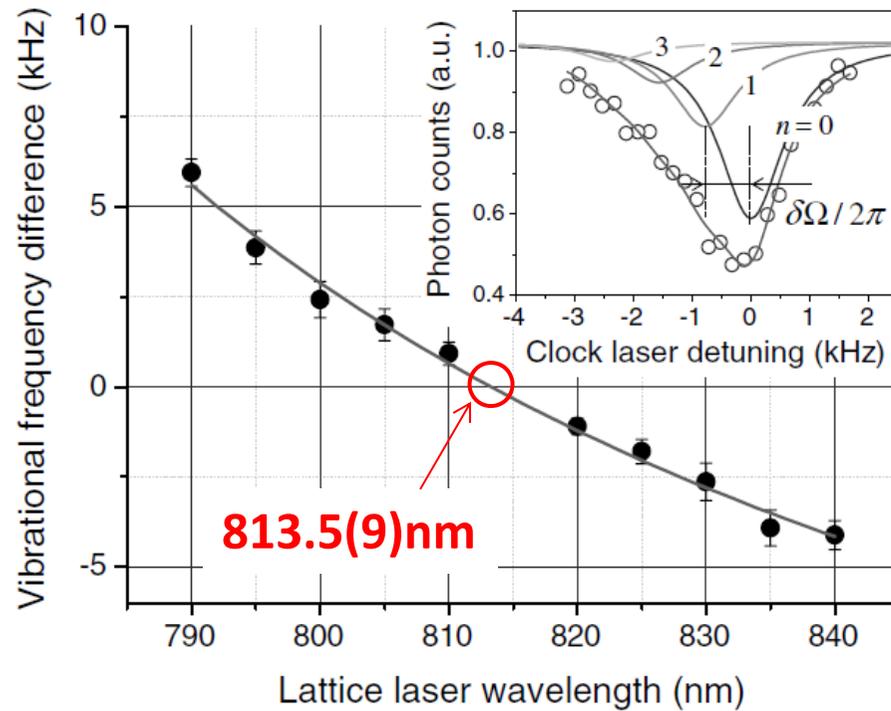


- 周波数だけで、遷移周波数への摂動を制御
- 周波数は9-12桁まで容易に制御可能
- 光シフトの周波数依存性

$$\frac{d\nu_{ac}}{d\nu_L} = -1 \times 10^{-9}$$

- 18桁精度の実現には、魔法周波数を9桁で決め、プロトコルとして共有

光シフトを打ち消す魔法周波数



- 周波数だけで、遷移周波数への摂動を制御
- 周波数は9-12桁まで容易に制御可能
- 光シフトの周波数依存性

$$\frac{d\nu_{ac}}{d\nu_L} = -1 \times 10^{-9}$$

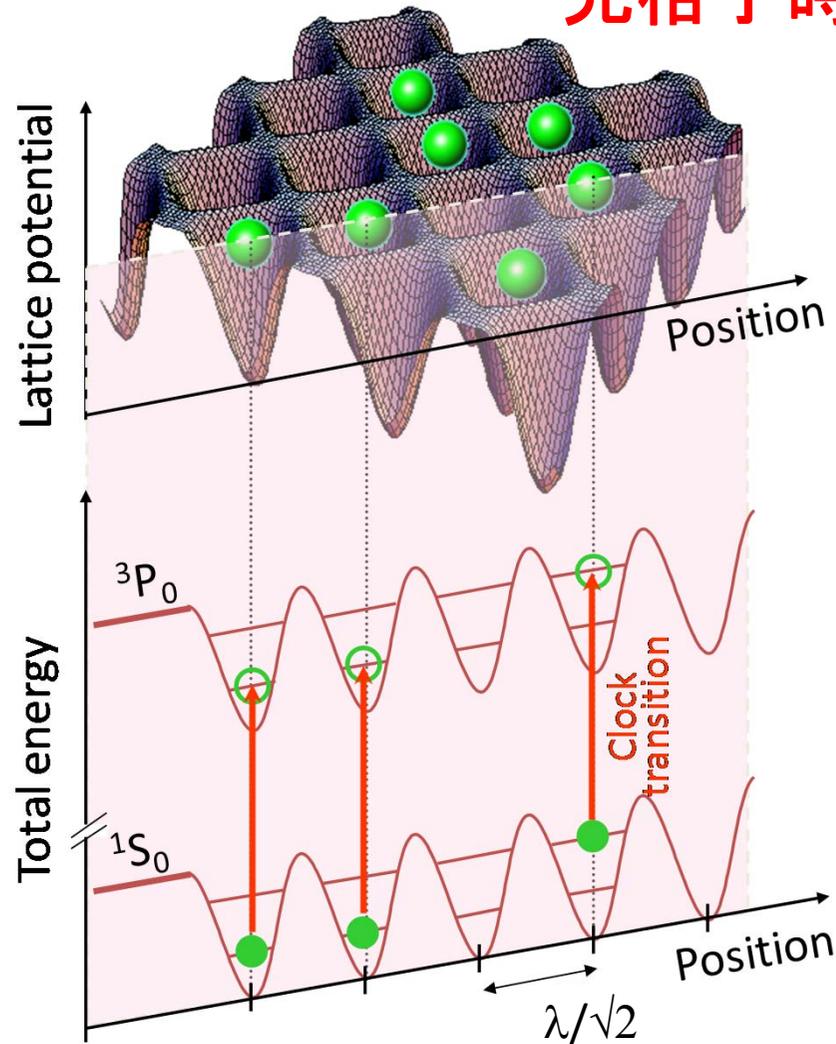
- 18桁精度の実現には、魔法周波数を9桁で決め、プロトコルとして共有

魔法波長の実証

M. Takamoto & H. Katori, Phys. Rev. Lett. 91, 223001(2003).

光シフトを打ち消す魔法周波数

“光格子時計”

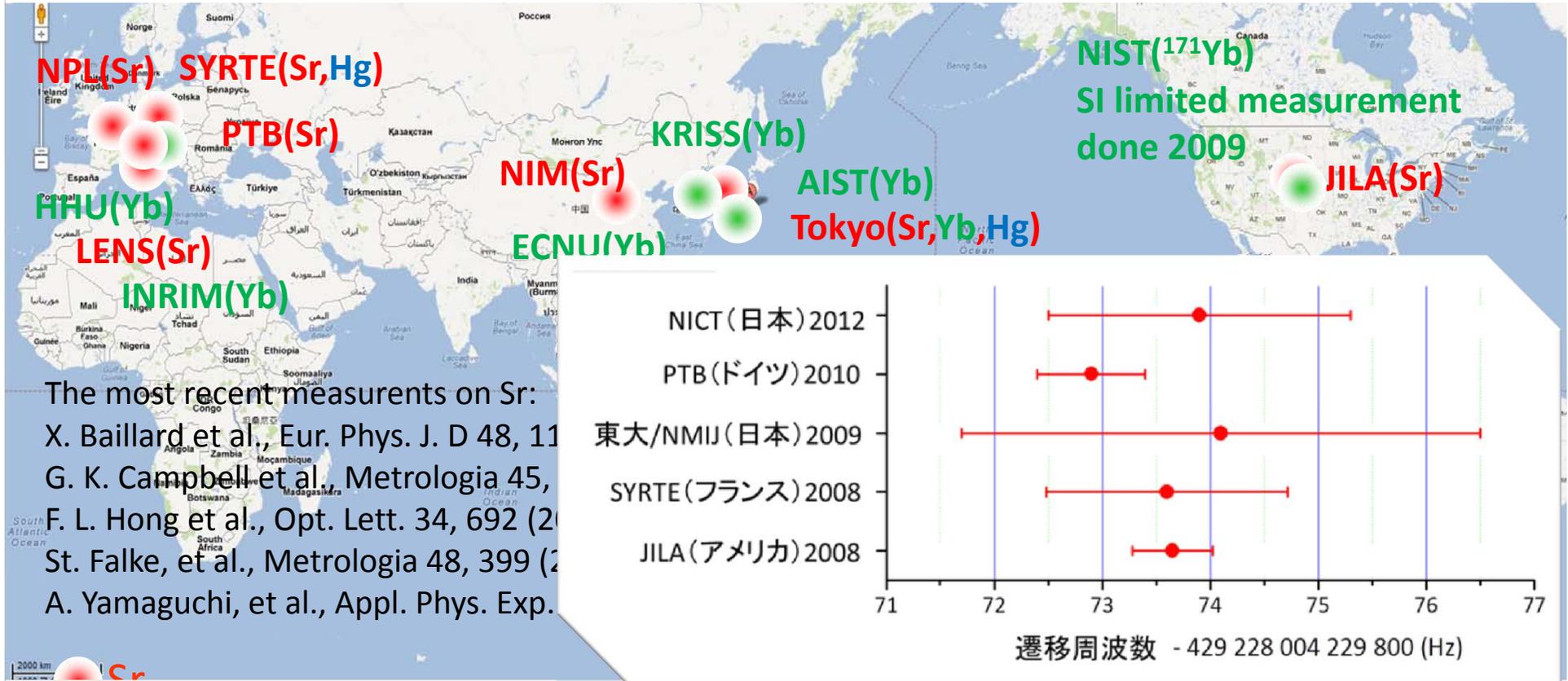


- 周波数だけで、遷移周波数への摂動を制御
- 周波数は9-12桁まで容易に制御可能
- 光シフトの周波数依存性

$$\frac{d\nu_{ac}}{d\nu_L} = -1 \times 10^{-9}$$

- 18桁精度の実現には、魔法周波数を9桁で決め、プロトコルとして共有

世界3極での光格子時計の実現と「秒の二次表現」の採択(2006.10)



The most recent measurements on Sr:
 X. Baillard et al., Eur. Phys. J. D 48, 11
 G. K. Campbell et al., Metrologia 45,
 F. L. Hong et al., Opt. Lett. 34, 692 (2009)
 St. Falke, et al., Metrologia 48, 399 (2011)
 A. Yamaguchi, et al., Appl. Phys. Exp.

国際度量衡委員会 (2009.10)勧告値

$$f_{87\text{Sr}} = 429\,228\,004\,229\,873.7 \text{ Hz}$$

相対的不確かさ 1×10^{-15} → SI秒の不確かさと等価。

逆に言えば、SI秒の定義のせいで、これ以上の情報を共有することが不可能。光格子時計は世界のCs原子時計を監視するスパクロに！

100億年動かしても、生じる誤差はわずか1秒

セシウム原子時計より1000倍正確に時をきざむ究極の時計が開発中だ。この精度なら、一般相対論が予言するほんのわずかな「時間の進み方の差」まで検出することができる。将来、1秒の基準を決める時計になると期待されている。

時計の基本的なしくみは、「振り子」と「歯車」である。1秒間に決まった数だけゆれる振り子と、それをカウントする歯車があれば、時計は正確に1秒をきざみつづける。

現在、1秒の基準をつくりだしているのは「セシウム原子時計」だ。セシウム原子時計の「振り子」は、セシウム原子の状態を変化させること（励起）ができるマイクロ波である。このマイクロ波が91億9263万1770回振動する時間を1秒と定めている。しかし、セシウム原子時計には問題点がある。セシウム原子どうしが衝突することがあり、このとき原子の状態がかわってしまうため、励起に必要なマイクロ波の振動数（1秒あたりの振動回数）が、わずかにずれてしまうのだ。

東京大学大学院工学系研究科の香取秀俊教授は、セシウム原子時計よりも正確な原子時計「光格子時計」の研究を進めている。光格子時計で使われるのはストロンチウム原子であり、マイクロ波より高い振動数をもつ可視光レーザーで励起される特徴をもつ。可視光の振動数は非常に高く、従来は計測できなかったが、2000年ごろに画期的な手法（光コム）が開発され、計測できるようになった。

光格子時計では、ストロンチウム原子を励起する可視光レーザーが429兆2280億422万9877回振動した時間を1秒とする。また、光でできた「卵パック」（光格子、右上に開）にストロンチウム原子を1個ずつ入れてレーザーを当てるため、原子どうしは衝突しない。

光格子時計はセシウム原子時計より1000倍精度が高く、100億年に1秒しかずれない。この精度では、地上で時計を設置する高さで1センチちがうだけで、一般相対性理論の効果による時間の進み方の差が検出できる。●

協力

香取秀俊 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻教授

光共振器

半導体レーザーから送られてきたレーザーのゆらぎを取り除き、安定させる。ストロンチウム原子を励起するための時計レーザーとして使う。

半導体レーザー

電流を流してレーザーをつくりだし、光共振器へ送る。

5. 時計レーザー

ストロンチウム原子を励起するためのレーザー。時計の振り子の役割。ほんの少しでも加減数が多いと、時計の精度が落ちる。

4. 光格子

複数のレーザーを交差させると、エネルギーの高いところと低いところが格子状にできる。これを「光格子」という（右上にイラスト）。1マイクロKまで冷却されたストロンチウム原子は、光格子に捕獲される。

光格子時計のしくみ(1~7)

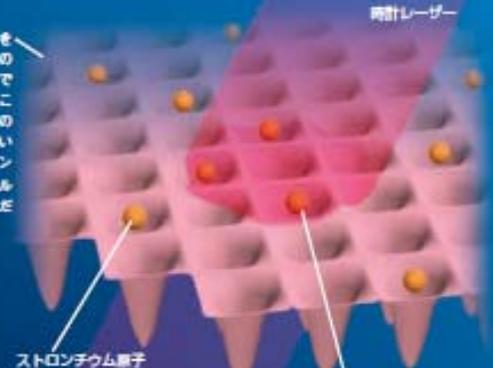
右下にみえるオープンで個体のストロンチウムを加えて気体にする(1)。気体のストロンチウム原子は「レーザー冷却」という特殊な方法で2段階で冷却され(2、3)、原子はほぼ静止する。冷却されたストロンチウム原子は、メインチャンバーの中で光格子に1個ずつ閉じこめられる(4)。そこへ、振り子の役割をする時計レーザーを当て(5)、その加減数が原子を励起する加減数になっているかを光検出器で調べる。わずかにずれれば、時計レーザーの加減数をコンピューターで制御する(6)。ストロンチウム原子が励起されたときは、この時計レーザーの加減の回数も、光コムとよばれるカウンターで数える(7)。この時計レーザーが429兆2280億422万9877回振動する時間が1秒である。



7. 光コム (光振動数カウンター)
ストロンチウム原子を励起させることができたときの時計レーザーの加減数を正確に計測する。時計の標準の役割。

6. 制御コンピューター
検出器からの情報を処理し、ストロンチウム原子を励起できるように、光共振器に時計レーザーを調整させる。励起できたら、そのときの時計レーザーを光コムに送る。

光格子
卵パックのような形をしている。実際にこのように見えるのではなく、格子状のイメージは、エネルギーの高低差をあらわしている。数万個のストロンチウム原子が、エネルギーの高い、へこんだ部分に捕獲される。



ストロンチウム原子

時計レーザー

磁場の修正を行うためのコイル。光格子中のストロンチウム原子が加減数などの影響を受けないようにする。

励起された原子
適切な加減数の時計レーザーが当たると、ストロンチウム原子は励起する。ここでは励起した原子を、色をかえて表現している。

メインチャンバー

内部に設置されているミラーでレーザーを反射させ、立体的な光格子をつくる。円柱の直径は約20センチメートル。内部は超高真空になっている。

真空ポンプ

1. オープン

内部は約500度Cに加熱され、個体のストロンチウムが気体になる。

2. 第1段階の冷却レーザー (青)

気体のストロンチウム原子を冷却するレーザー (青色)。この段階で1ミリK (絶対温度0Kはマイナス273.15度C) まで冷却する。冷却されたストロンチウム原子は捕獲しながらメインチャンバーへ移動する。

3. 第2段階の冷却レーザー (赤)

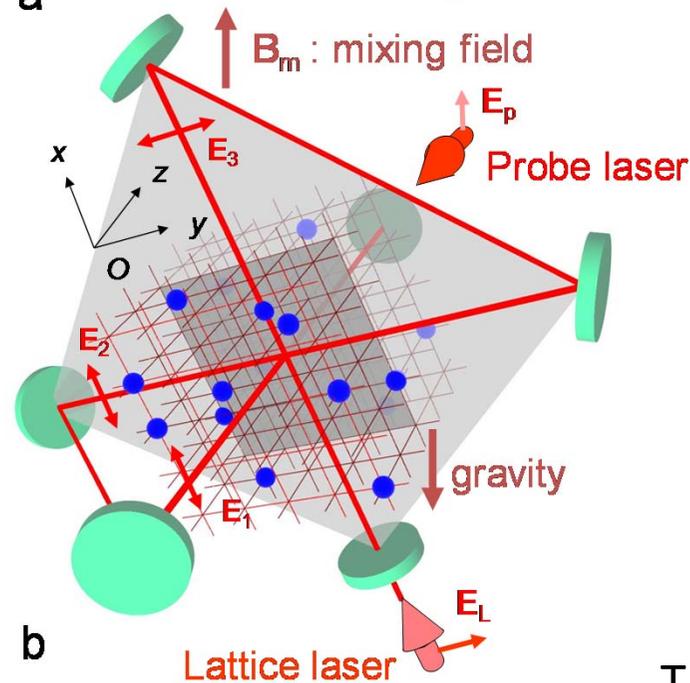
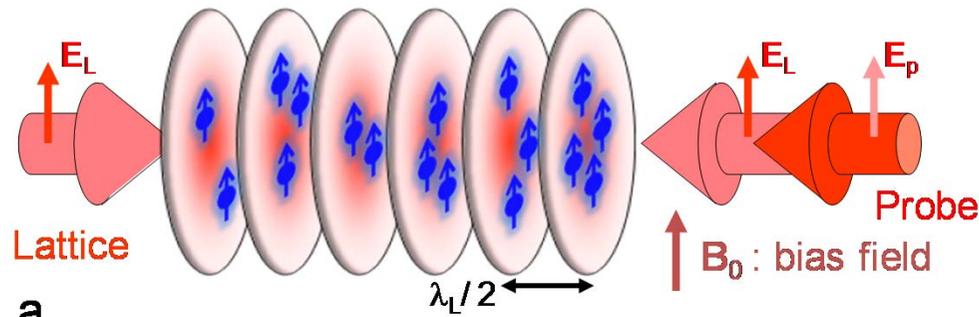
第1段階で1ミリKまで冷却されたストロンチウム原子に、上下、左右、前後からレーザーを当てて、さらに1マイクロK (マイクロは100万分の1) まで冷却する。

光検出器

ストロンチウム原子が励起されたかどうかを調べる装置。

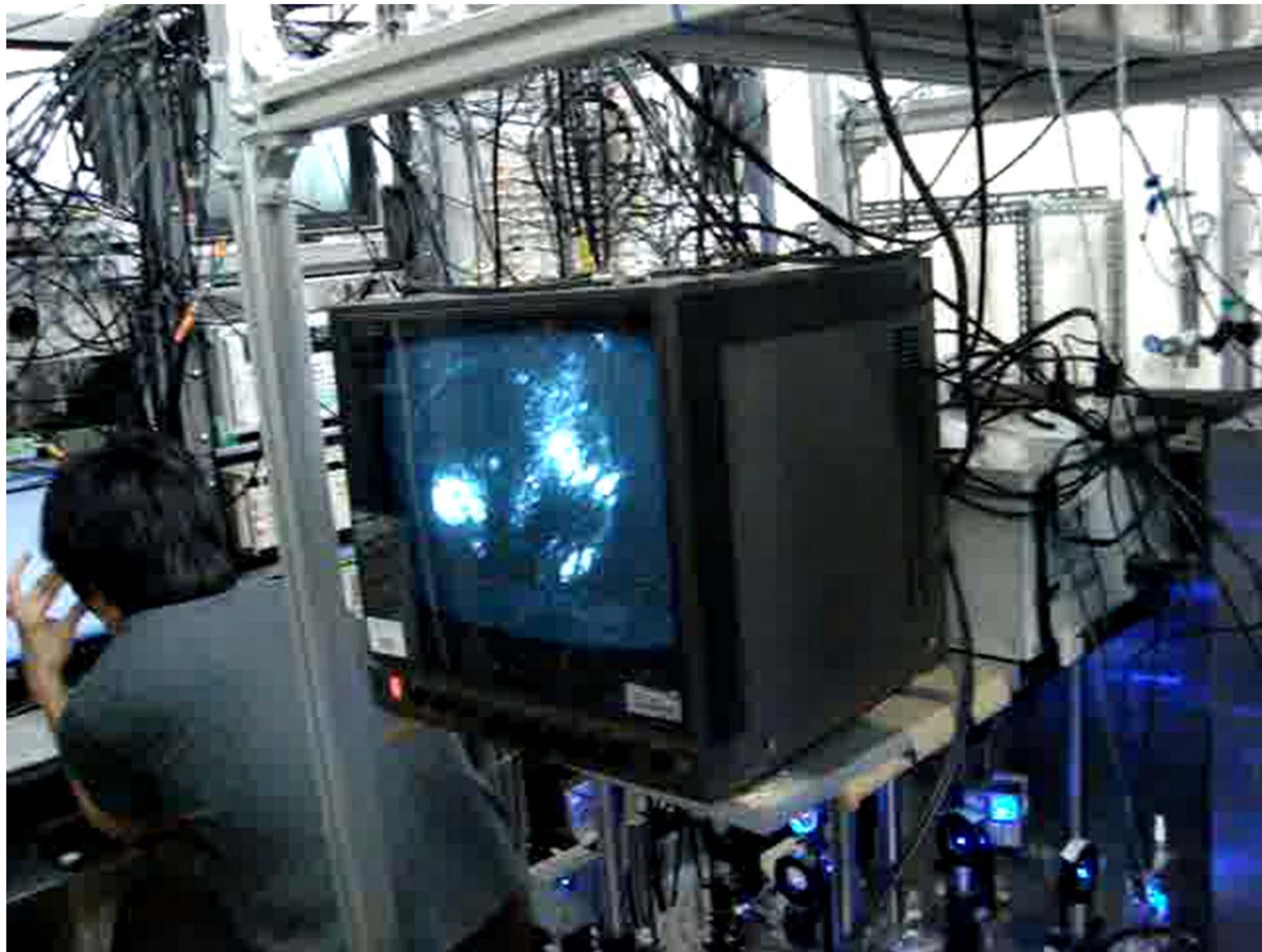
光格子時計の最適設計：光格子の幾何学と量子統計

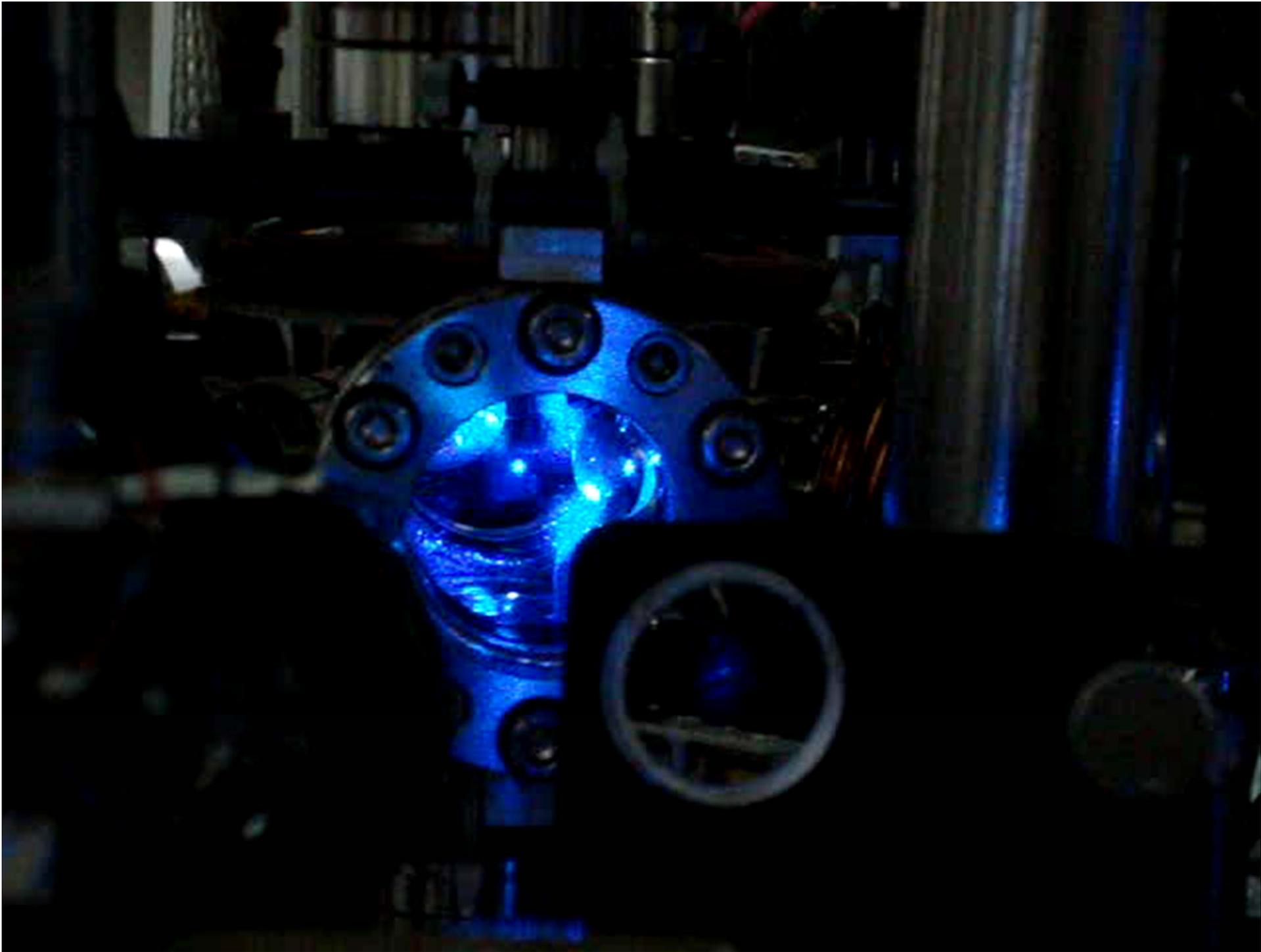
- フェルミ粒子を用いる「偏極1次元光格子時計」
- ボース粒子を用いる「3次元光格子時計」



- 1次元のパンケーキ型・光格子ポテンシャルに複数個のフェルミ粒子を束縛
 - パウリの排他律による原子衝突の抑制
- 3次元の格子ポテンシャルにボース粒子を1個ずつ配置
 - ボソンのバンチング阻止

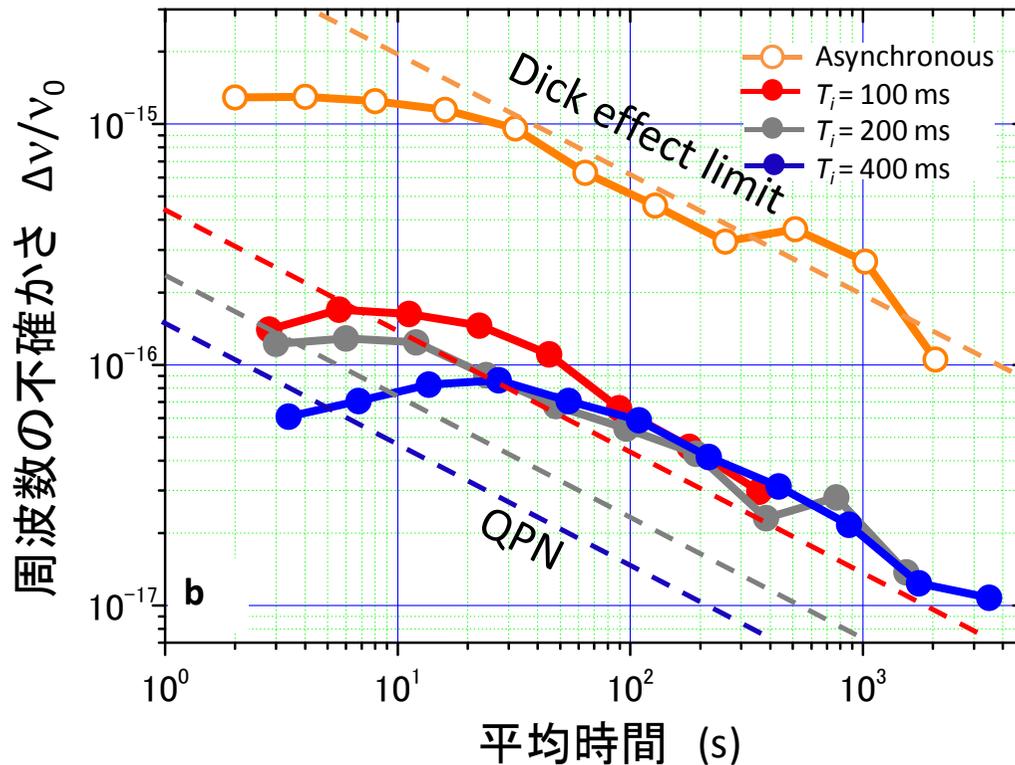
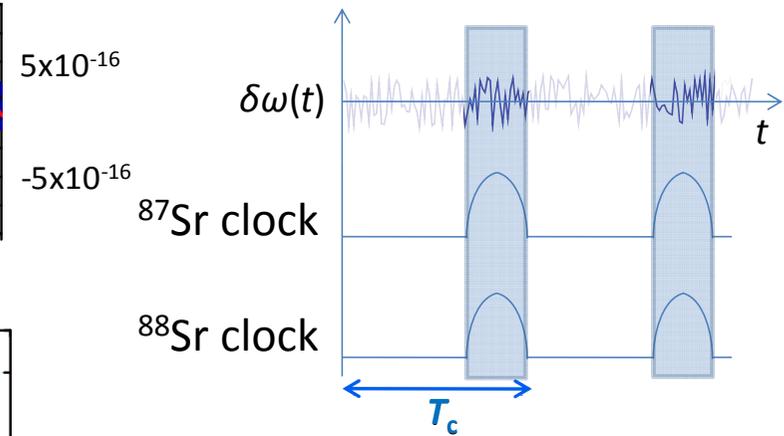
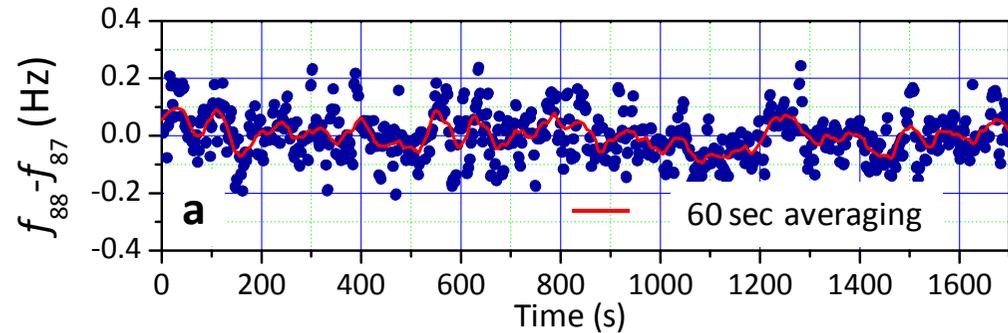
2台の時計比較でSI秒の限界を超える





2台の光格子時計 (^{87}Sr - ^{88}Sr) の同期比較

—レーザーノイズを相殺して量子限界に迫る—



光時計で $N \approx 1,000$ 原子の量子限界を初めて達成。

- ← Moon tidal
- ← Sun tidal
- ← Black body radiation shift ($\Delta T < 0.3\text{K}$)
- ← Gravitational red shift for 10 cm height difference

M. Takamoto, T. Takano, & H. Katori, Nature Photon. 5, 288 (2011).

重力が強いと時間はゆっくり進む

アインシュタインの一般性相対論の予言

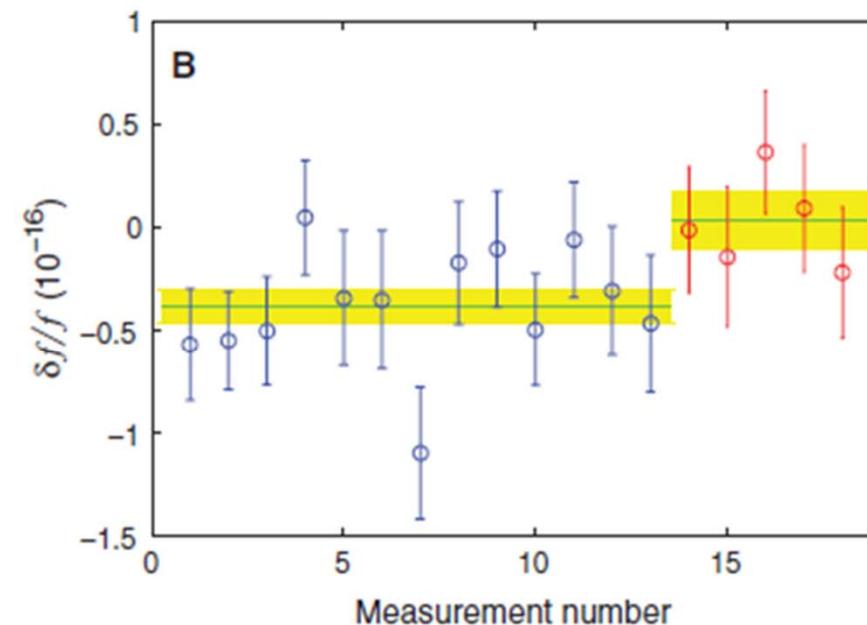
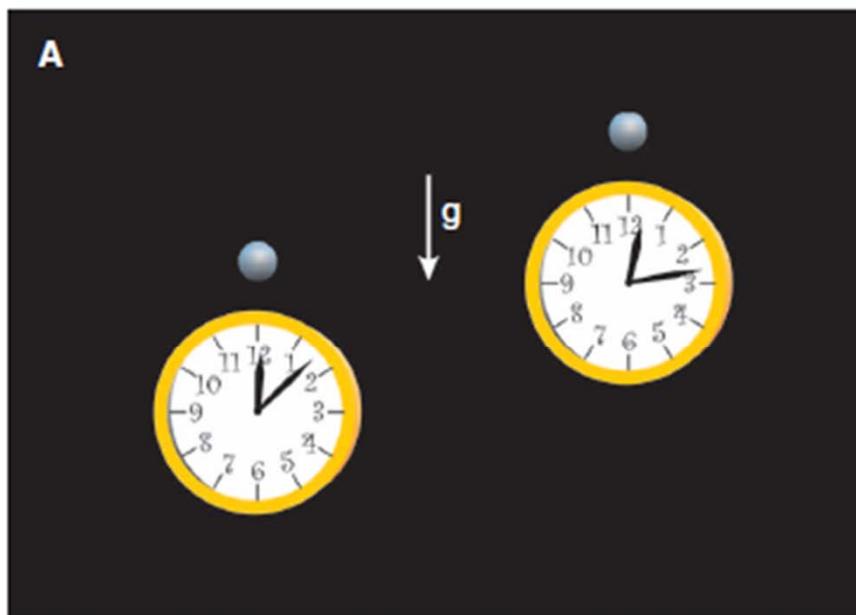
- ハーバードタワー実験(1960年): $\Delta h=22.6\text{m}$ で 2×10^{-15} を検証
- **単一イオン時計(2010年): $\Delta h=30\text{ cm}$ で 3×10^{-17} を検証(1日積算)**

1630

24 SEPTEMBER 2010 VOL 329 SCIENCE

Optical Clocks and Relativity

C. W. Chou,* D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland



Physical effects that may contribute to a flicker floor @ 1×10^{-17}

Contributor	Parameter to be controlled	^{87}Sr atoms in 1D lattice	^{88}Sr atoms in 3D lattice
Lattice scalar light shift	Lattice laser frequency	$\Delta f = 4 \text{ MHz}$ ($I = 13 \text{ kW/cm}^2$)	$\Delta f = 6 \text{ MHz}$ ($I = 7.9 \text{ kW/cm}^2$)
Probe light shift	Laser intensity	Negligible ($I = 0.7 \mu\text{W/cm}^2$)	$\Delta I/I = 0.3\%$ ($I = 74 \text{ mW/cm}^2$)
Blackbody shift at 300 K	Environmental temperature	$\Delta T = 0.1 \text{ K}$ ($T \approx 296 \text{ K}$)	$\Delta T = 0.1 \text{ K}$ ($T \approx 294 \text{ K}$)
Second-order Zeeman shift	Environmental magnetic field	$\Delta \nu_0 = 37 \text{ mHz}$ ($B_0 = 0.23 \text{ mT}$)	$\Delta \nu_m = 100 \text{ mHz}$ ($B_m = 0.83 \text{ mT}$)
First-order Doppler shift	Relative motion of lattice and lasers	$v = 3 \text{ nm/s}$	$v = 3 \text{ nm/s}$

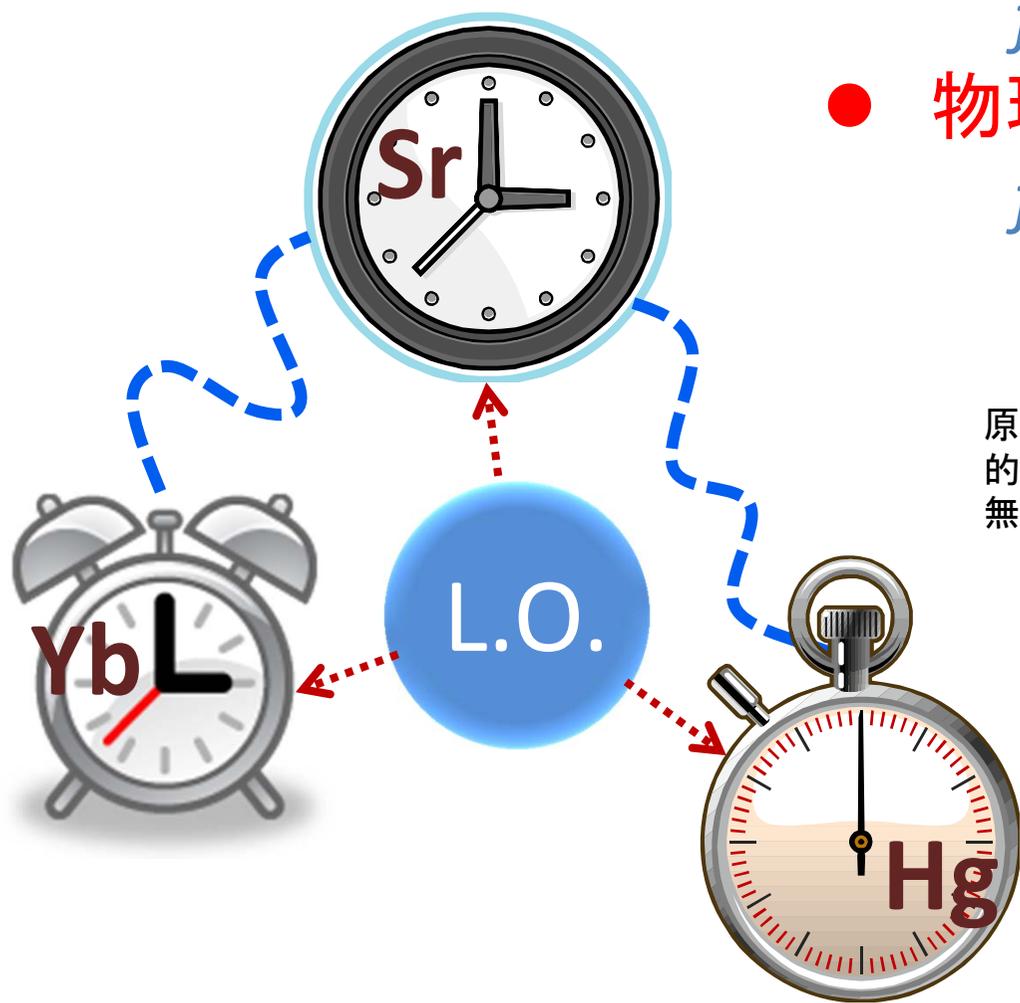
装置の絶対温度を定義するのは難しい

光学定盤の熱膨張・振動、プレート移動10cm/年

1×10^{-17} for $T_i = 400 \text{ ms}$

時計をつなぐと新しい物理が見えてくる

- ジオイドの探索
- 物理定数の恒常性？
 $f[\text{Hg}(\alpha(t)^2)]/f[\text{Sr}(\alpha(t)^2)]$
- 物理定数と重力の結合？
 $f[\text{Hg}(\alpha(U_g))]/f[\text{Sr}(\alpha(U_g))]$



原子の中における電子の軌道エネルギーの相対論的補正に現れる。電磁相互作用の結合定数を表す無次元の定数。

電磁相互作用の強さ

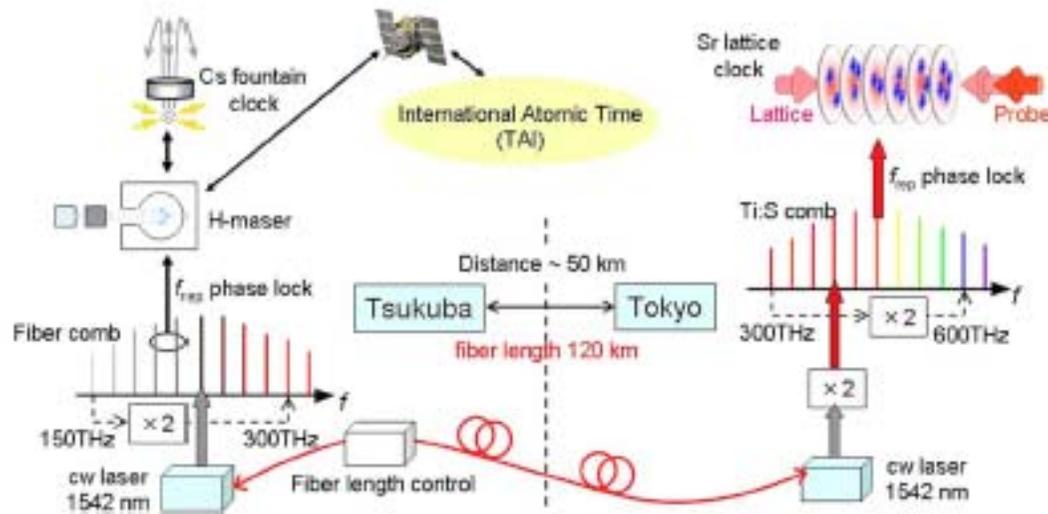
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137.036}$$

光速(相対論的定数)
 プランク定数
 (量子論的定数)

高安定な光時計の配信は大問題

従来の衛星による伝送 10^{-15} @1day

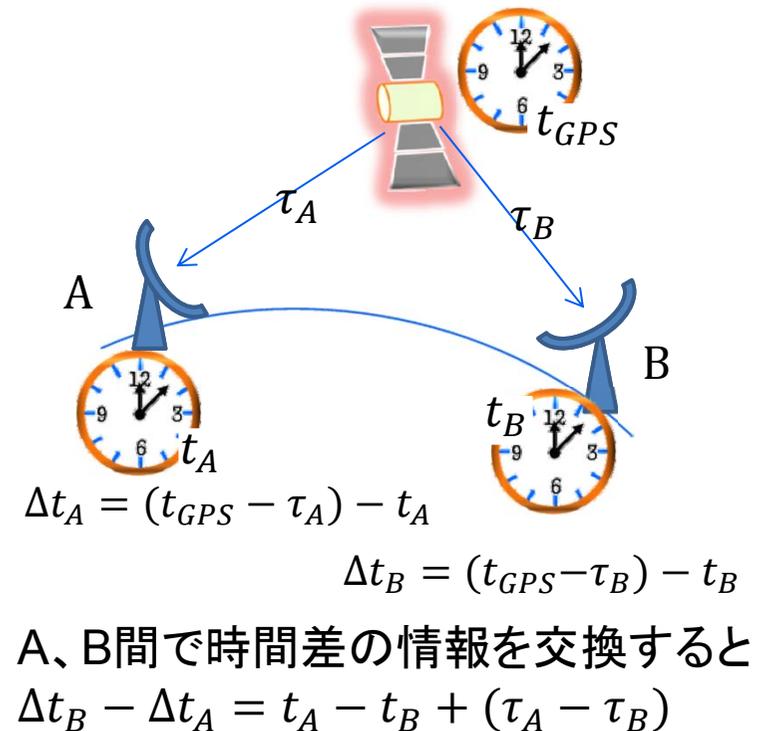
世界中で光ファイバリンクを建設中
~ 10^{-18} @1000s



F. L. Hong et al., Opt. Lett. 34, 692 (2009).

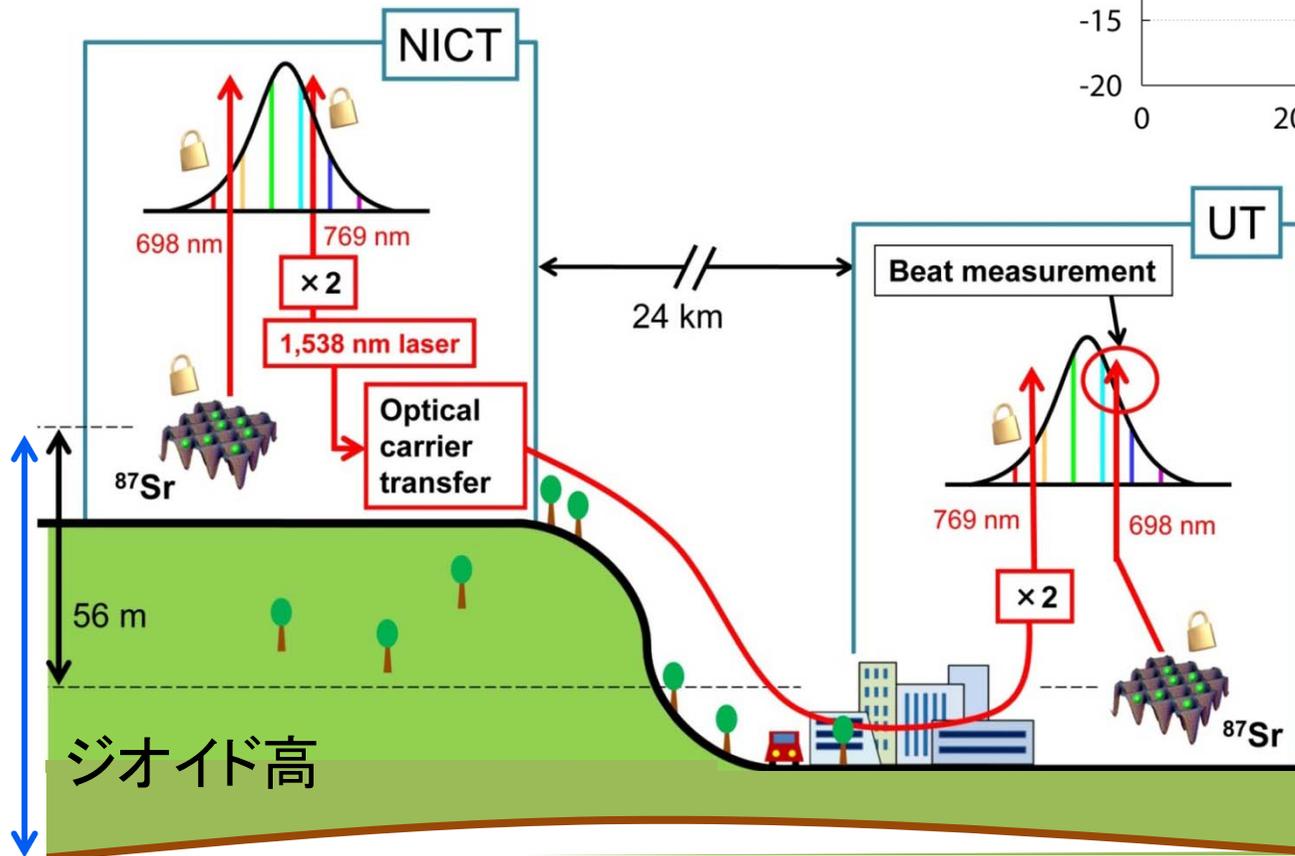
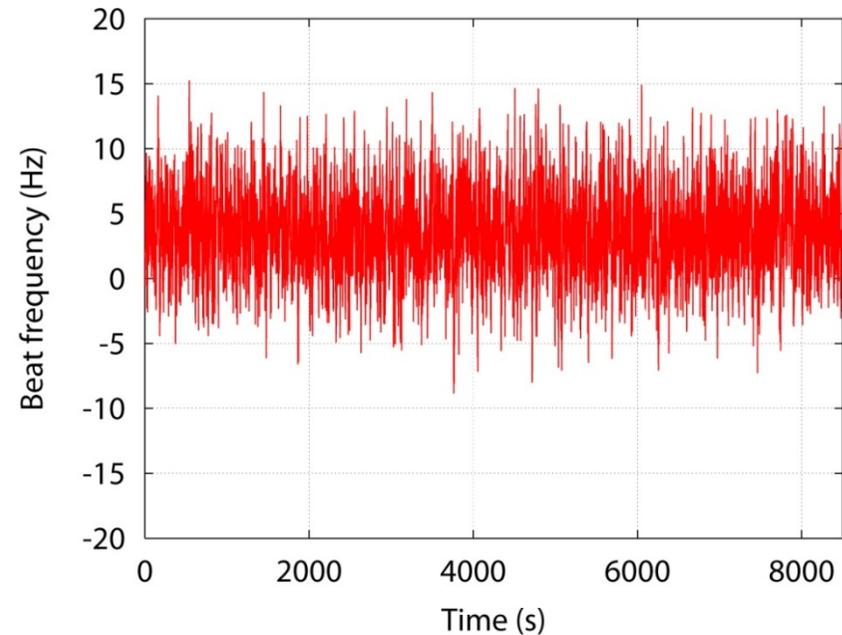
AIST-U. of Tokyo: 120 km

ドイツではミュンヘン、ブラウンシュバイクをつなぐ900kmの
周波数伝送ファイバが開通→やがて全ヨーロッパ圏へ



遠隔地間の時計比較

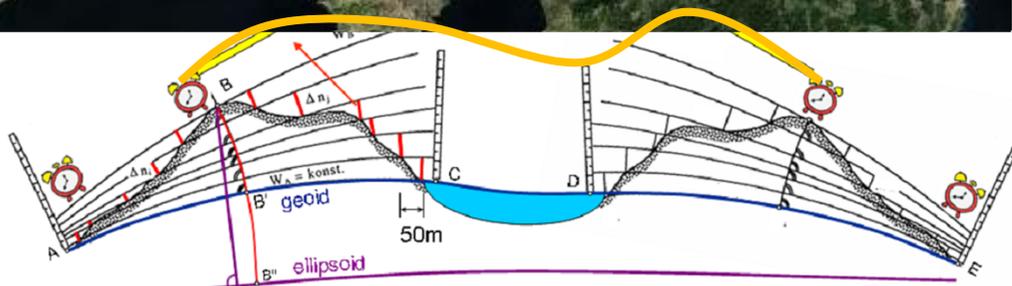
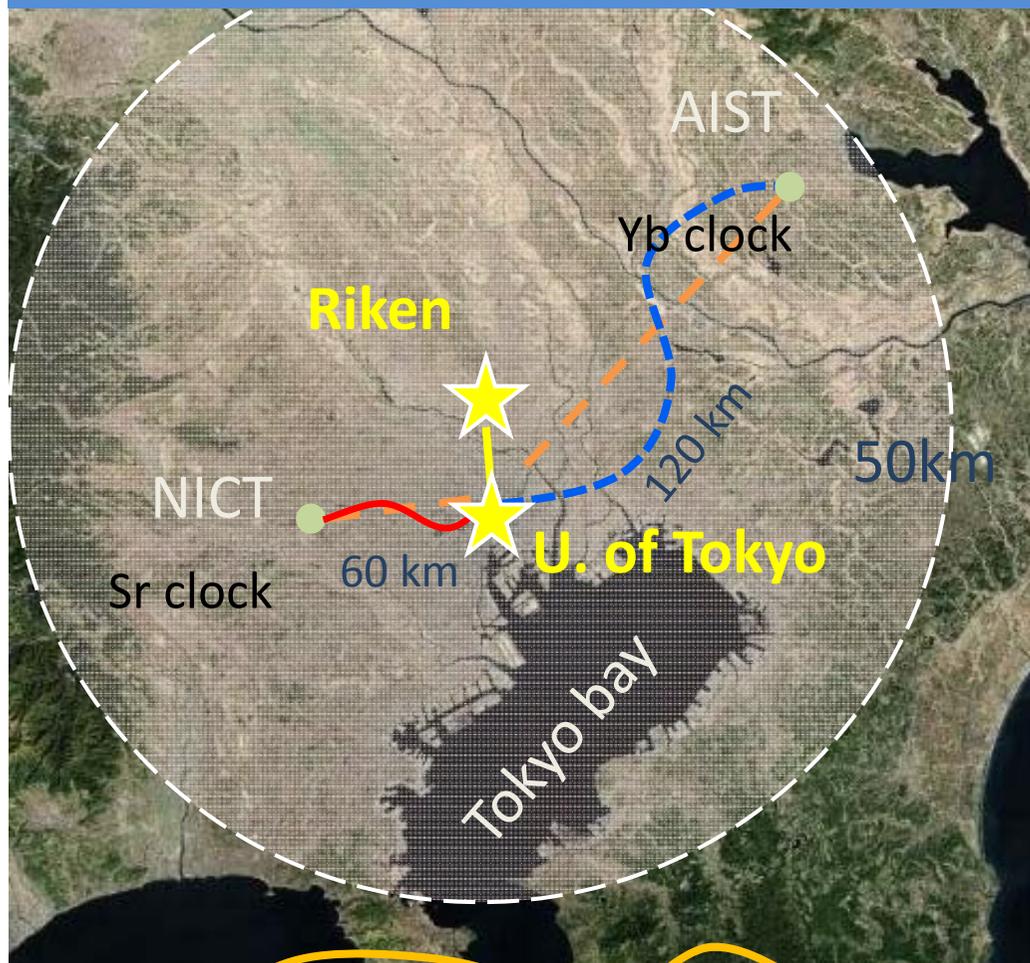
- 重力シフト (2.6Hz) の実時間測定
- SI秒を介さない2機関の光格子時計の直接比較 $\frac{\nu_{\text{NICT}} - \nu_{\text{UT}}}{\nu_0} = 0.9(7.3) \times 10^{-16}$



Yamaguchi, A., Fujieda, M., Kumagai, M., Hachisu, H., Nagano, S., Li, Y., Ido, T., Takano, T., Takamoto, M., & Katori, H., Appl. Phys. Exp. 4, 082203 (2011).

ジオイド面 (重力の等ポテンシャル面)

東京圏で光格子時計のネットワークを作る



重力シフトを使って測地学

ジオイド: 重力の等ポテンシャル面、日本では東京湾の平均海面で定義

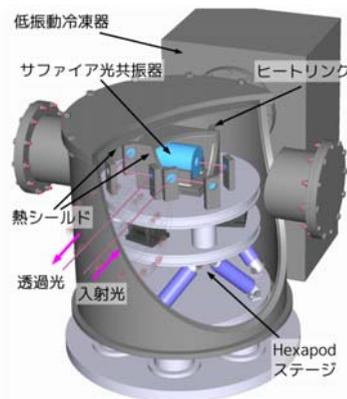
$$\Delta f/f = g\Delta H/c^2$$

- ジオイド高は30-50 cm, or $3-5 \times 10^{-17}$ の不確かさでマッピングされている
- 時計の比較はジオイド高の測定と等価
- 地球は柔らかすぎて、長距離にわたっての正確な時間の共有は難しい
- 時計は、ジオイド高のセンサーになる: 資源探索、地殻の変動...

18桁の周波数比較に向けて

低温共振器によって熱雑音を抑制

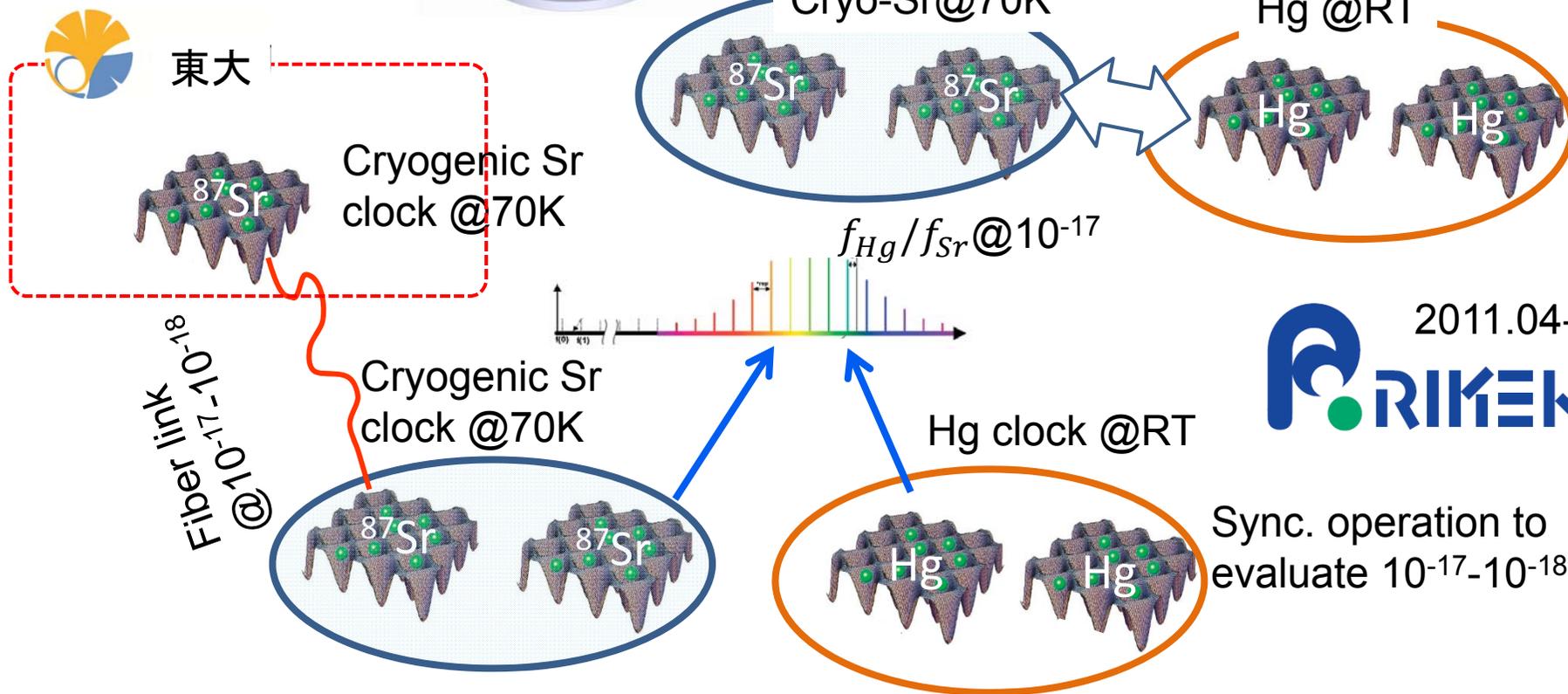
$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\delta L}{L}$$



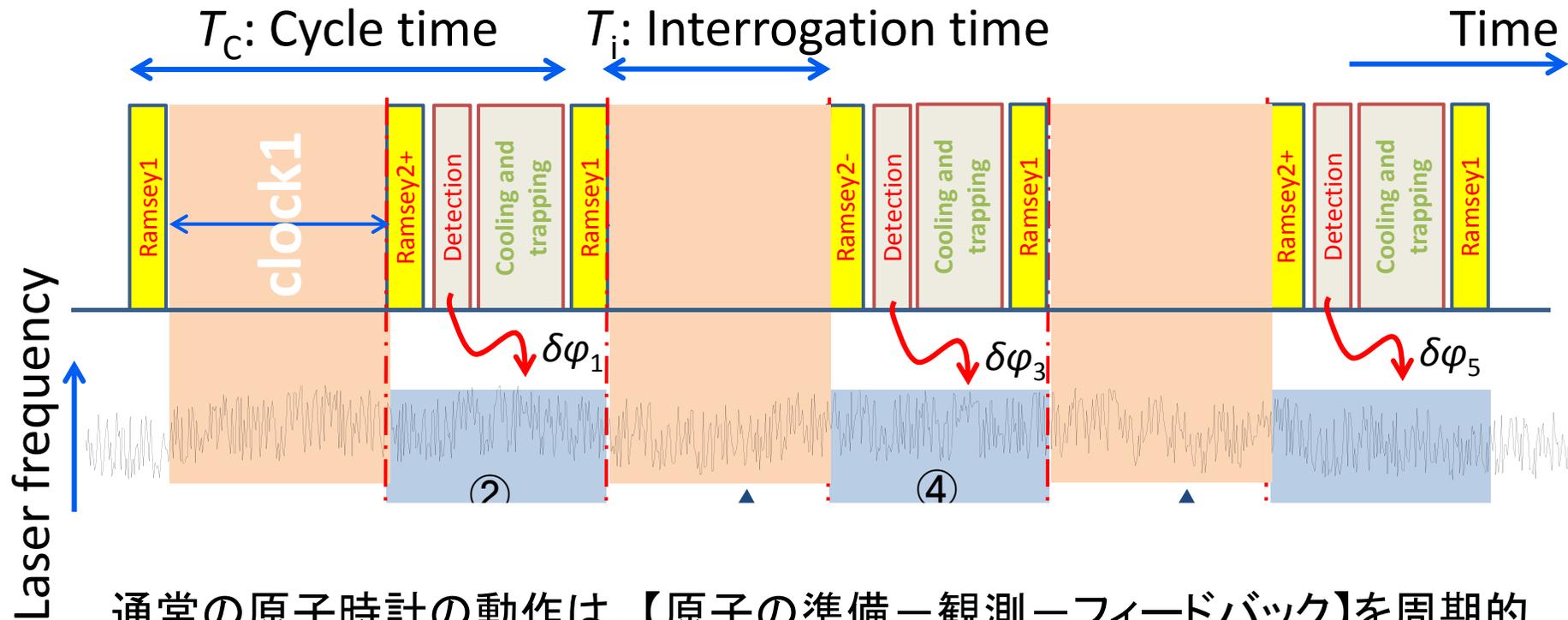
Constancy of constants?

$$f[\text{Hg}(Z_{\text{Hg}}^2\alpha(t), U_g)^2)] / f[\text{Sr}(Z_{\text{Sr}}^2\alpha(t), U_g)^2)]$$

No Dead time operation:
highly stable clock utilizing stable L.O.



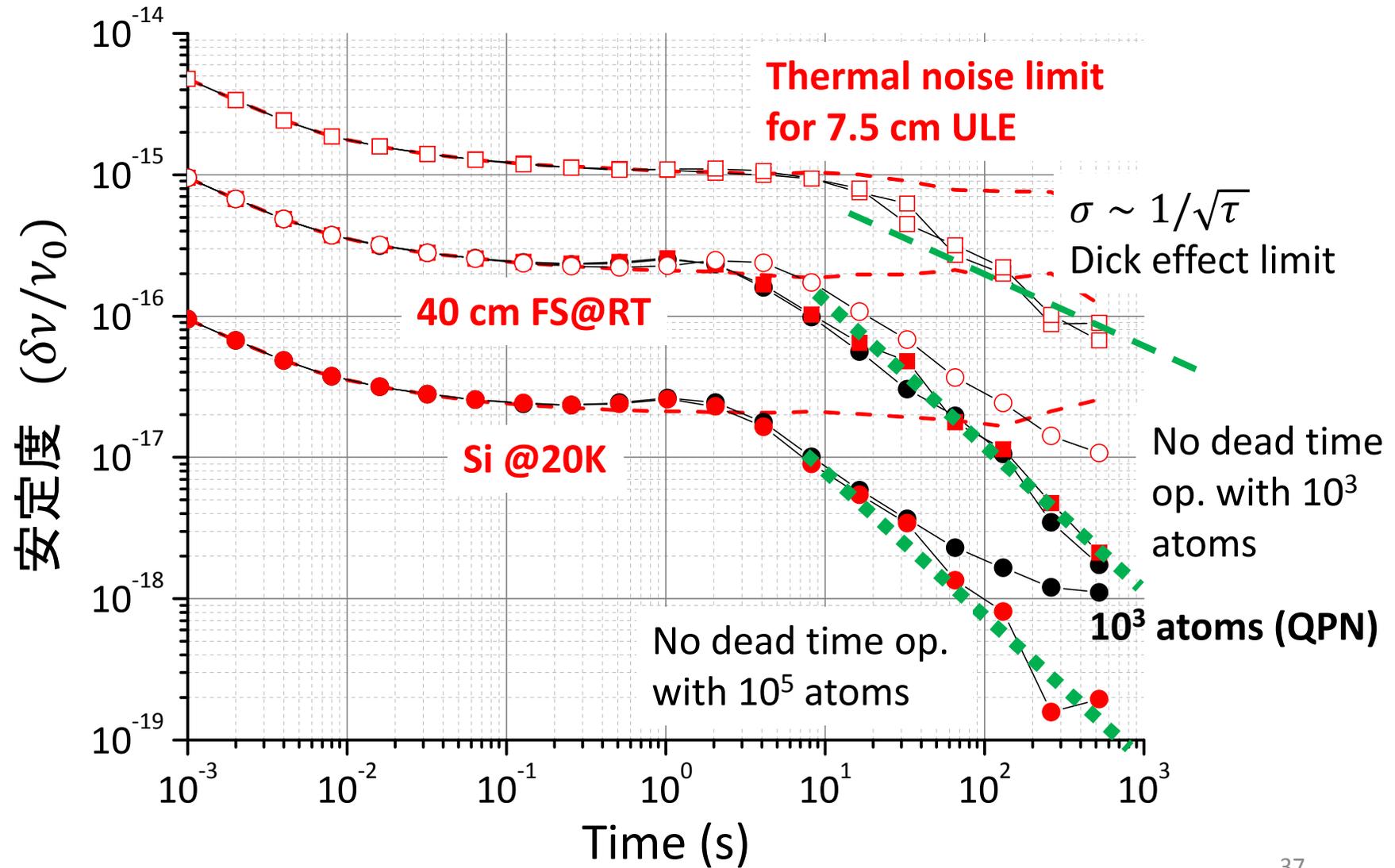
No dead time operation of clocks



通常の原子時計の動作は、【原子の準備－観測－フィードバック】を周期的に繰り返す→レーザーの周波数揺らぎを観測しない不感時間が存在

- $1/T_C$ より遅いレーザー周波数変動のみ制御
- n/T_C ($< 1/T_i$)のレーザー周波数ノイズは、低周波にダウンコンバートされホワイトノイズとなってレーザー安定度を劣化(Dick効果)

Frequency stability trajectory simulation



Blackbody radiation shifts for Sr atoms

Stefan-Boltzmann law: BBR energy

© Estimated BBR shifts of Sr atoms

$$\nu_{\text{BBR}} = -2.4 \text{ Hz} \times (T/300 \text{ K})^4$$

Uncertainty with $\Delta T = 0.1\text{K}$ at room

temperature (300K) $\Rightarrow \Delta\nu_{\text{BBR}}/\nu_{\text{Sr}} = 1 \times 10^{-17}$

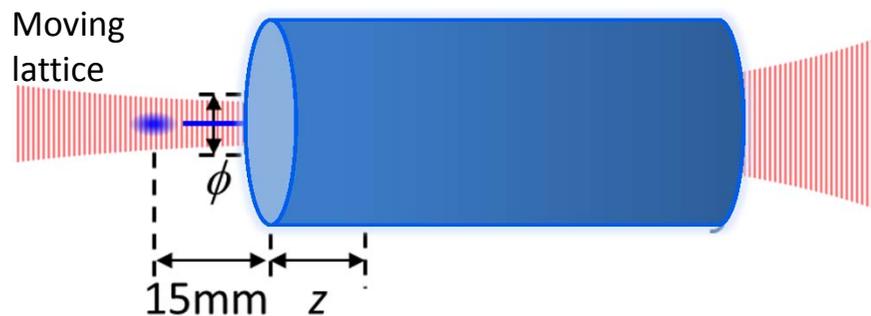
Atom	$\delta\nu_{\text{BBR}}$ (Hz)	ν_0 (Hz)	$\delta\nu_{\text{BBR}}/\nu_0$	Uncertainty
Mg	-0.258(7)	6.55×10^{14}	-3.9×10^{-16}	1×10^{-17}
Ca	-1.171(17)	4.54×10^{14}	-2.6×10^{-15}	4×10^{-17}
Sr	-2.354(32)	4.29×10^{14}	-5.5×10^{-15}	7×10^{-17}
Yb	-1.34(13)	5.18×10^{14}	-2.6×10^{-15}	3×10^{-16}

S. G. Porsev and A. Derevianko,
PRA **74**, 020502 (2006)

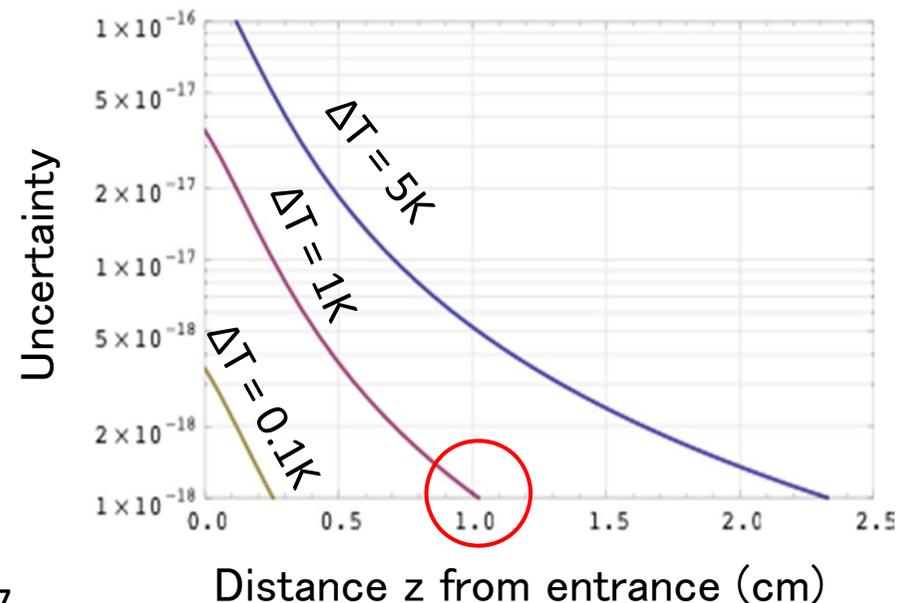
© To reduce the uncertainty of BBR shifts below $\frac{\Delta\nu_{\text{BBR}}}{\nu_{\text{Sr}}} = 1 \times 10^{-18}$
 $\nu_{\text{BBR}} \sim 10 \text{ mHz @ } T=70\text{K}$

$$\Delta T = 1\text{K} \Rightarrow \Delta\nu_{\text{BBR}}/\nu_{\text{Sr}} = 1 \times 10^{-18}$$

→ Operate clocks in cryogenic environment at $\sim 70\text{K}$ with $\Delta T < 1\text{K}$



Th. Middelmann, et al arXiv:1009.2017



Development of two cryogenic Sr optical lattice clocks for synchronous/no-dead-time operation

2012.04.23

- Fiber based system: BS & DM are replaced by WDM couplers
- Finally covered by μ -metal box

- Synchronous operation : Evaluation of BBR or other systematic shifts
- No dead time operation: Sr-Hg/remote clocks comparison

Optical lattice clock with mercury

H. Hachisu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 053001 (2008)

Magic wavelength determined: L. Yi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 073005 (2011)

1) Heaviest lattice clock candidate

✓ Large α dependence: $\Delta\nu/\nu=0.8 \times 10^{-16}$ for $\Delta\alpha/\alpha=10^{-16}$

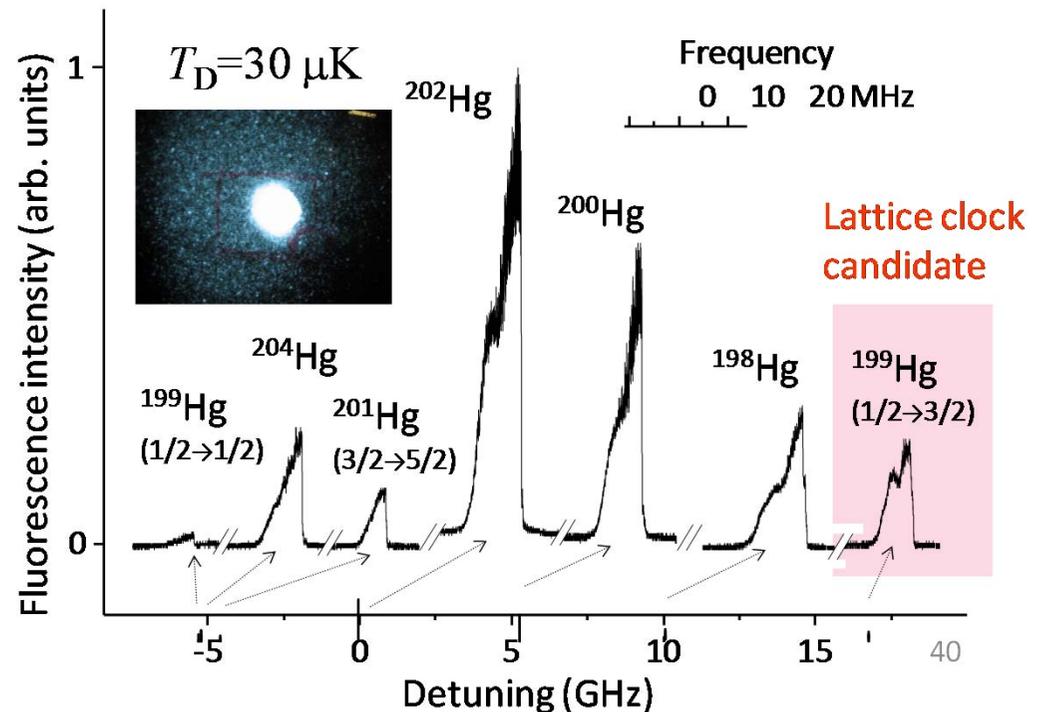
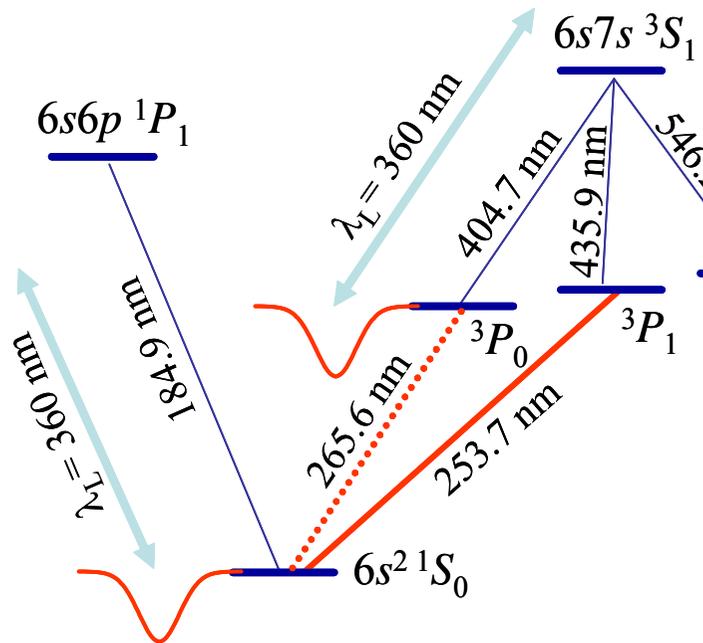
2) Very small BBR shift: $-0.18\text{Hz}@300\text{K} \ll \text{Sr,Yb}$

3) Hyperpolarizability effects: $\delta\nu \sim 0.3\text{mHz}$

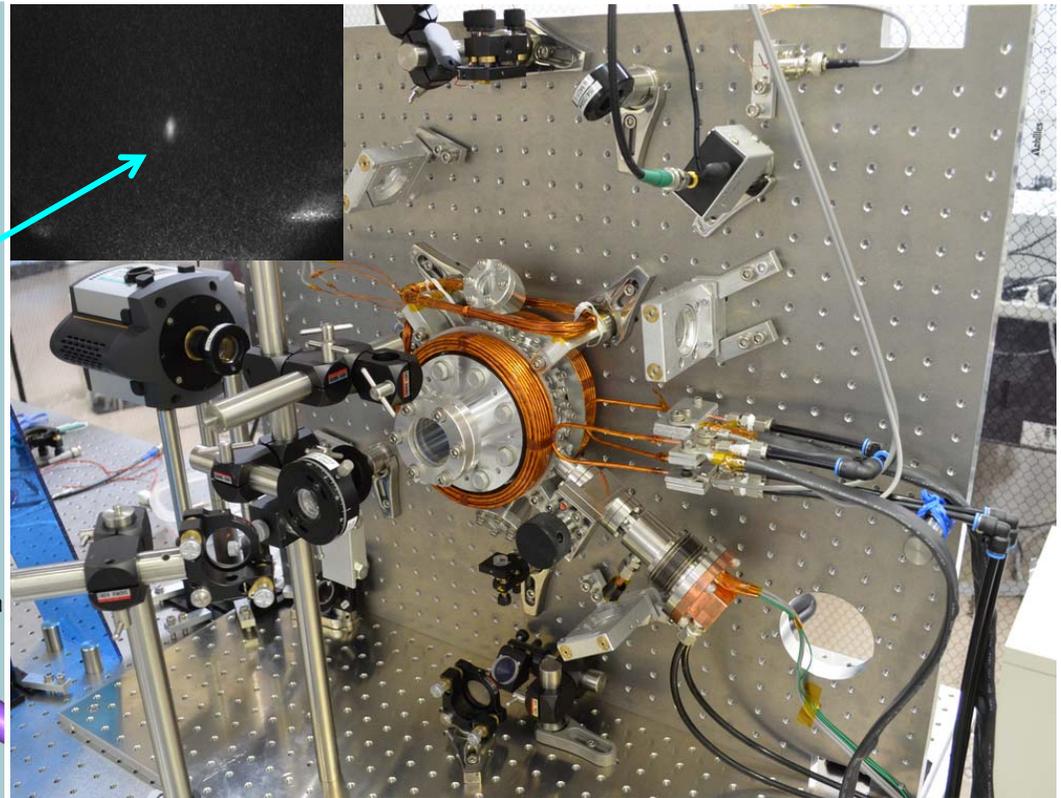
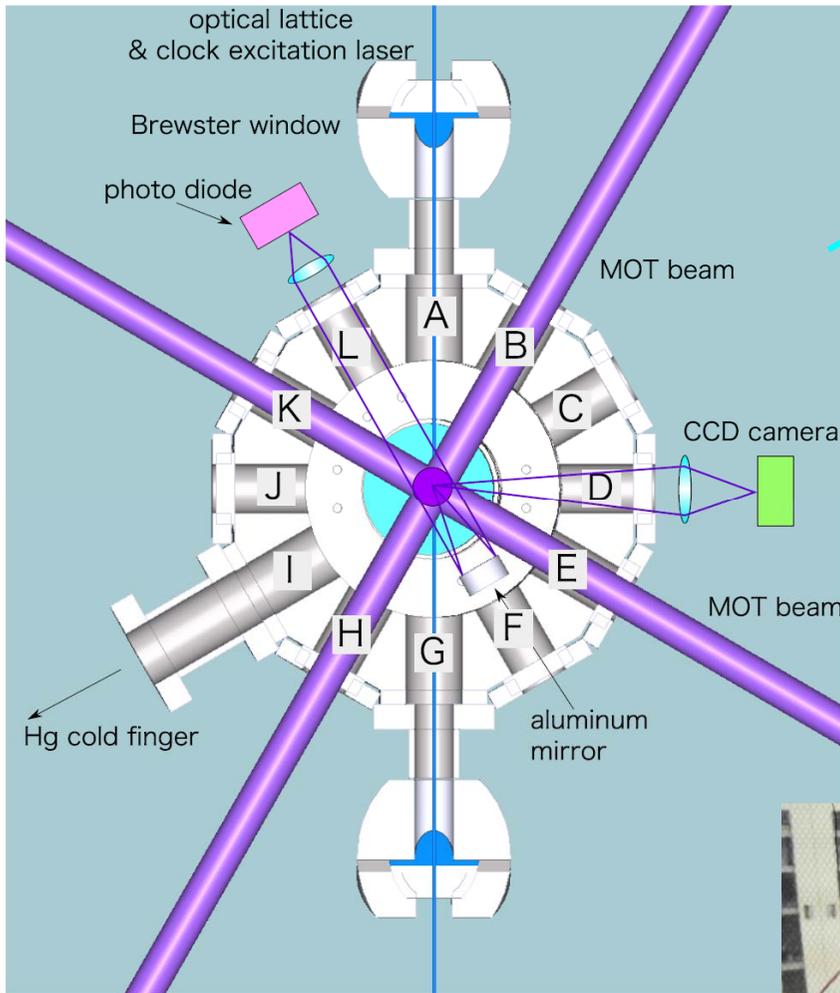
4) Require high laser intensity for lattice : $\sim 2 \text{ kHz}/(\text{kW}/\text{cm}^2)$

✓ Moderately cold atomic sample necessary

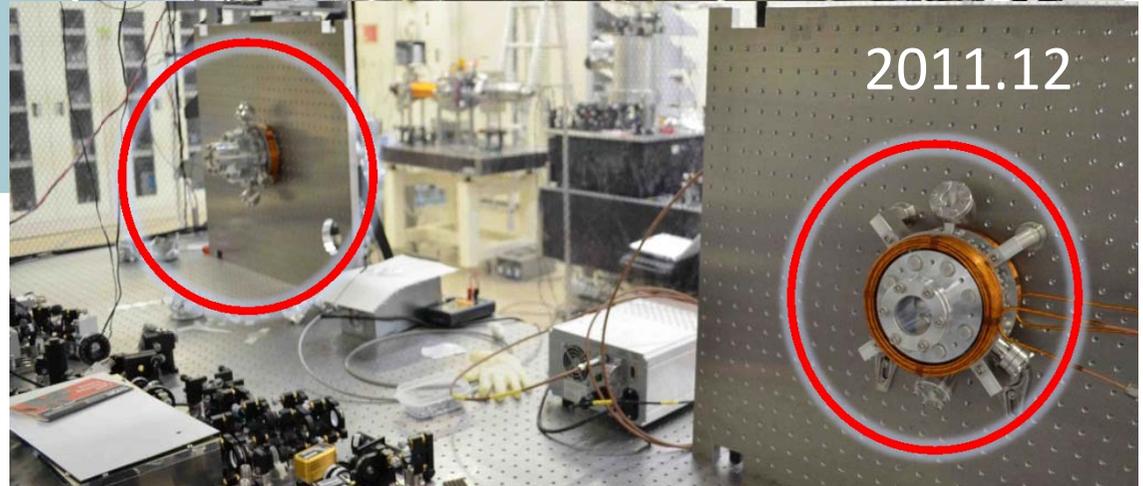
10^{-19} accuracy achievable!



Current status: MOT and Lattice



Two Hg systems:
Hg-Hg synchronous comparison
No dead time measurement
Hg/Sr frequency ratio



The Group

University of Tokyo/ERATO

T. Takano, D. Yu, K. Hashiguchi, I. Ushijima, K. Yamanaka, S. Okaba, T. Ohkubo,
T. Oita, K. Araki, M. Tanaka / Si-cavity: Y. Aso, N. Ohmae, A. Shoda, T. Ushiba, H. K.

RIKEN/ERATO

M. Takamoto, N. Ohmae, P. Thoumany, M. Das, B. Christensen, T. Akatsuka,
M. Kobayashi, H. K.



18桁の時間計測をめざして
—正確過ぎて正確でなくなる新しい時間の概念—

- 光格子時計は「魔法波長」の導入して、多数原子の同時観測で高速な時間計測を実現
—実時間で重力で歪む時空間を見せてくれる—
—物理定数は本当に定数なのか？

- 相対論的な時空間の工学的応用へ
- 科学の新しいプローブで自然の声を聴く
—望遠鏡、顕微鏡、加速器、...、原子時計
- 今まで見えなかった時間の隙間に何があるか？