

夏期研修会2012 ～量子情報未来テーマ開拓研究会～
8月8日(水)～8月18日(土)
沖縄県・宮古島・ホテルブリーズベイマリーナ

量子計測と光格子時計

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

Personal research background

- Finish D. thesis in '94 in Tokyo (Prof. Fujio Shimizu)
 - Ultracold **neutral** rare-gas atoms (Ar^* , Kr^*), atomic interactions...
- Post doc. in Walther's group in MPQ, Garching (94.9-97.3)
 - Prof. Shimizu's suggestion: Do not join ion clock group.
 - Excitement of the **Cirac-Zoller gate**; a step **toward QC**, as later realized in **Wineland's** group and **Blatt's** group
 - Spent nearly 2 years for terrible micro-motion compensation, QC seemed far away, ...
- **Fruitful Gifts from Garching**
 - **Huge amount of time to read Dr. Wineland's papers and his strategies**
 - **Never win the game as long as I follow his track**
 - **Glancing at In+ clock poster every day**
 - **We should work quickly with many atoms to recover 20 years' delay!**
- Simulating ion experiments with neutral atoms (97.4-present)
 - Narrowline cooling down to μK (1999) and "magic wavelength" optical trap (1999)
- Optical lattice clock proposal at FSM 2001

Quantum Metrology

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.

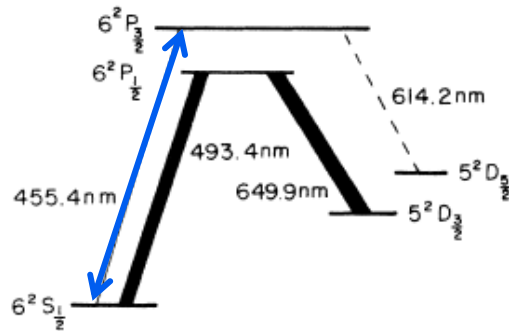


FIG. 1. Level structure of Ba^+ . The shelf level is the $5^2D_{5/2}$ state. The laser excitation is shown by the bold lines; the lamp excitation is indicated by the light solid line while the subsequent decay into the shelf level is indicated by the dashed line.

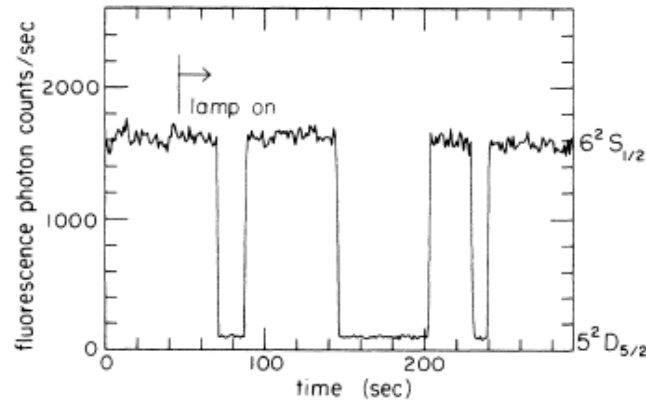
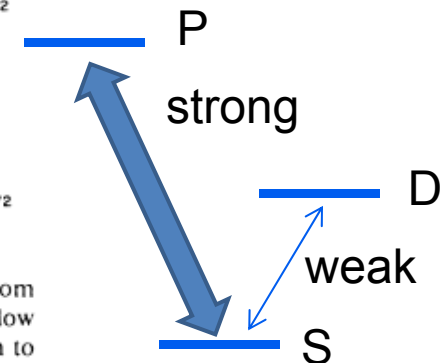


FIG. 2. A typical trace of the 493-nm fluorescence from the $6^2P_{1/2}$ level showing the quantum jumps after the hollow cathode lamp is turned on. The atom is definitely known to be in the shelf level during the low fluorescence periods.

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 10^4 個の光子を計測可能。検出器の量子効率PMT $>10\%$ 、PD $\sim 50-99\%$



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

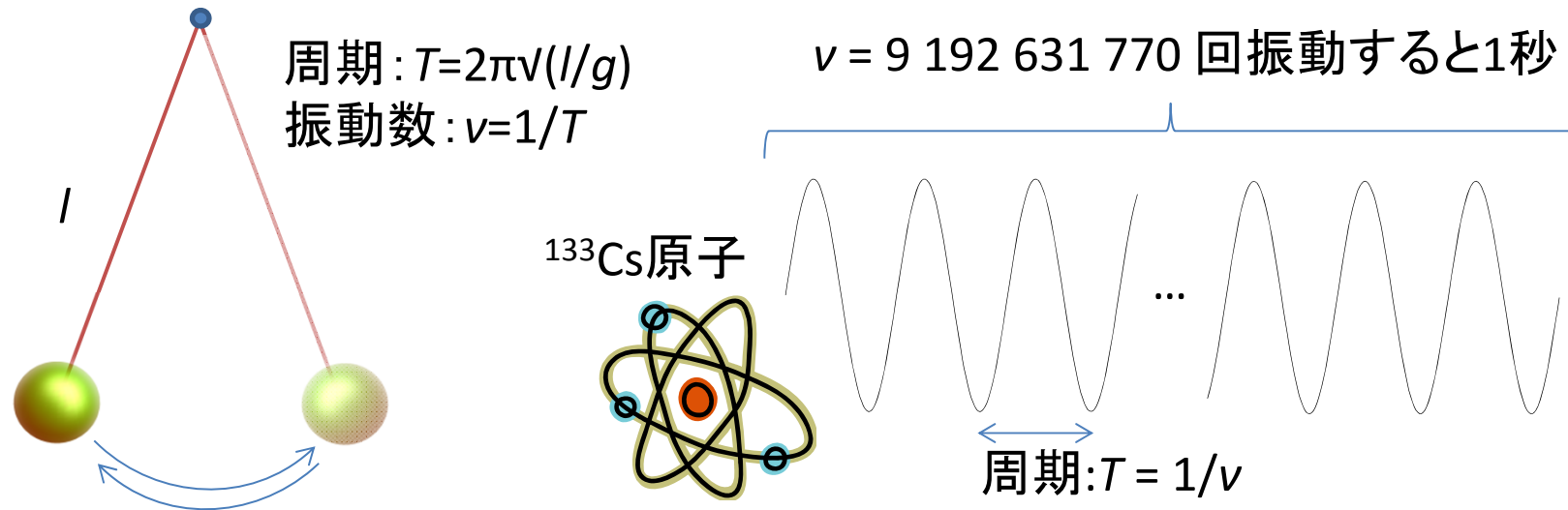
内容

- 原子時計の実現: 2状態間のエネルギー差を正確に測る方法
 - デーコヒーレンスの最小のqbitの実現
- 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

原子時計研究はなぜ面白い？

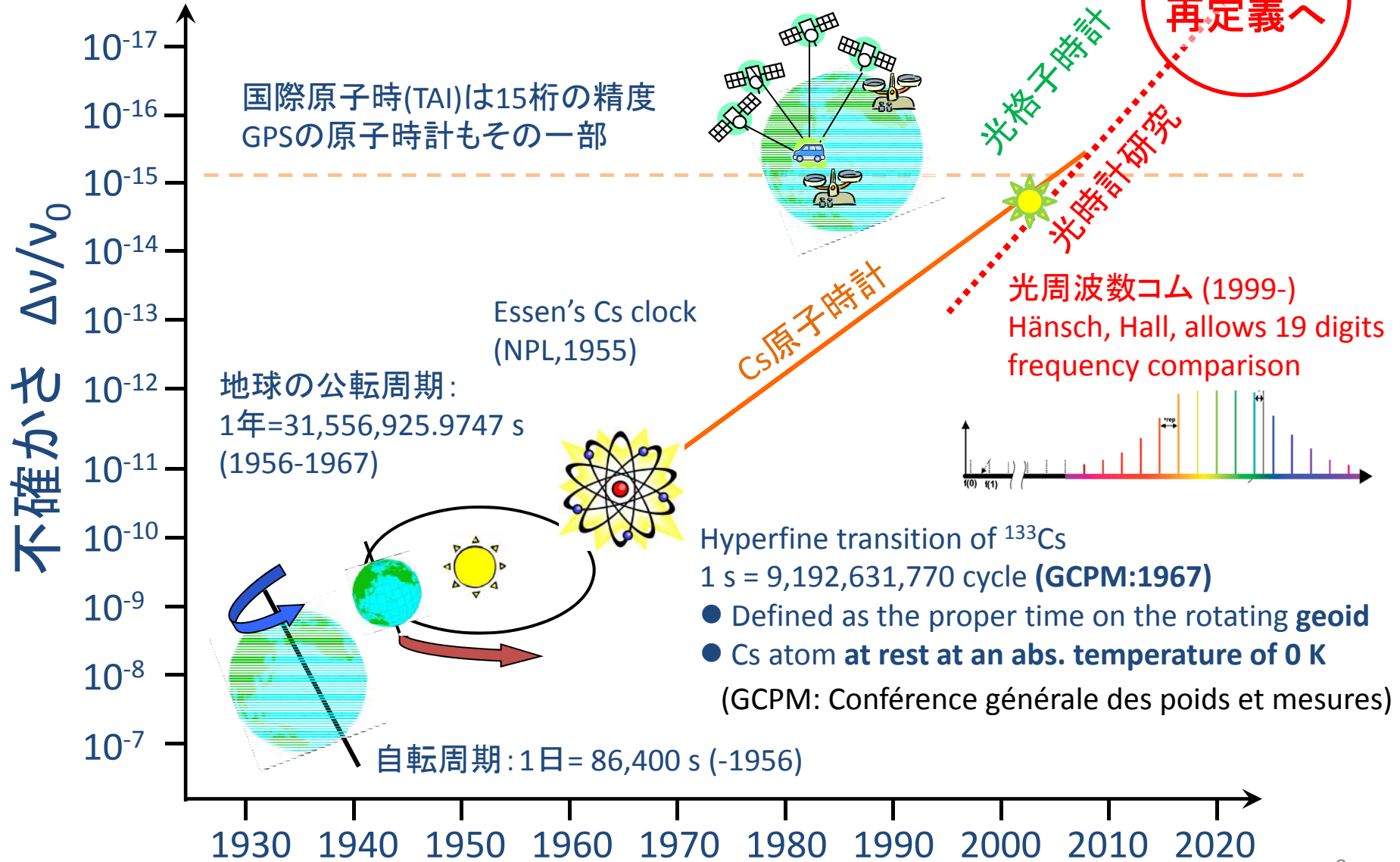
- 原子時計の精度
 - 科学計測の中で桁違いの精度を誇る
 - 精密計測・原子分光技術のベンチマークテスト
 - スーパーカー、スパコン、スパークライダー、...、**スパクロ**...
- 量子のルールだけで性能を競う(測定器の雑音を混入させない工夫) – Electron shelving –
- 極限的な精度で物理の根幹に迫る
- 物理として面白い上に、工学的にきっと役立つ
 - GPS、電波時計、高速ネットワーク同期...
 - 新しい工学ニーズの発掘: 50年前にGPSのカーナビ応用を考えるような斬新な発想が必要

どうやって時間を認識するか？



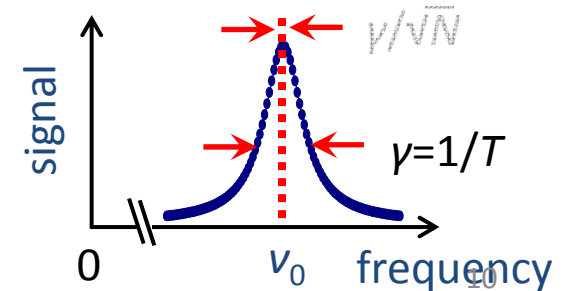
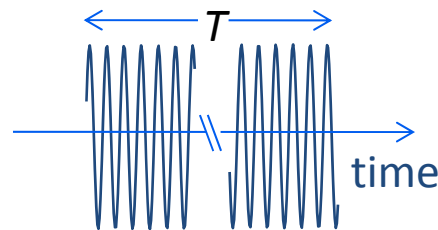
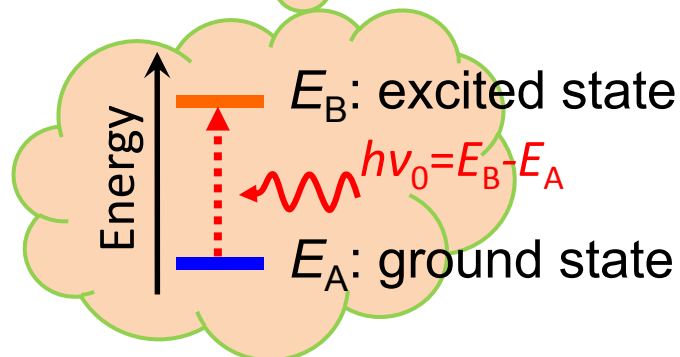
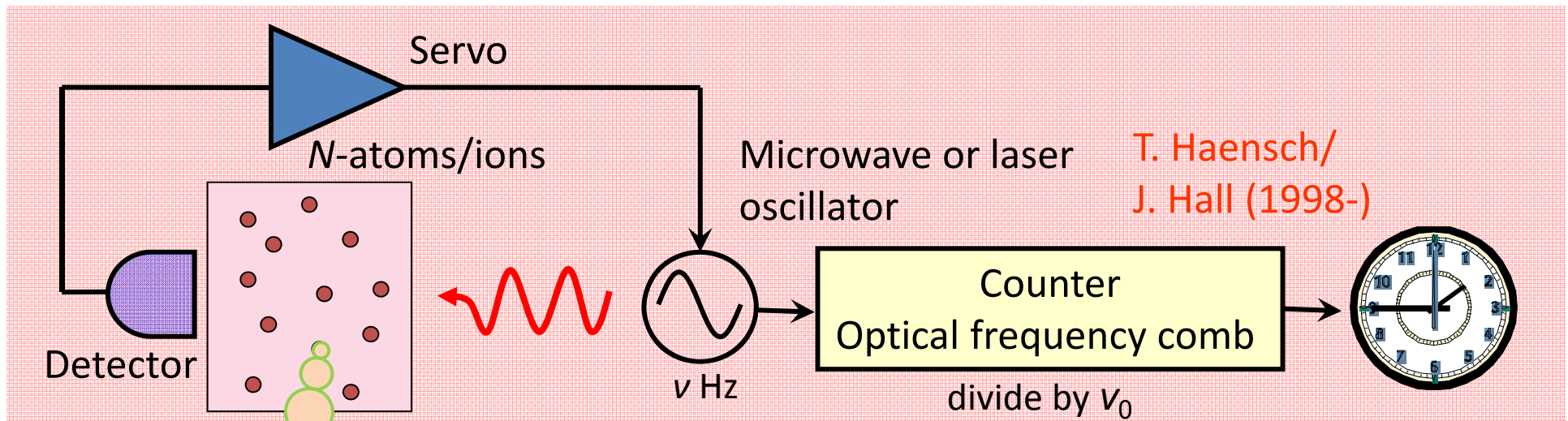
- 周期 T の現象を見出す: 地球の自転、振り子、原子の振動...
- 繰り返しの回数 n を数える: 経過時間 $t=n\cdot T=n/\nu$
- 周期が δT 狂うと、経過時間も $\delta t=n\cdot\delta T$ だけ狂う
→ 時計の精度: $\delta t/t = \delta T/T = \delta\nu/\nu$
- 時計精度 $\delta t/t$ は、振り子の周波数精度 $\delta\nu/\nu$ で読み替える
- $\delta t/t=1$ 秒/300億年、なら $\delta\nu/\nu=\delta t/t=10^{-18}$ が必要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

1秒の定義の変遷



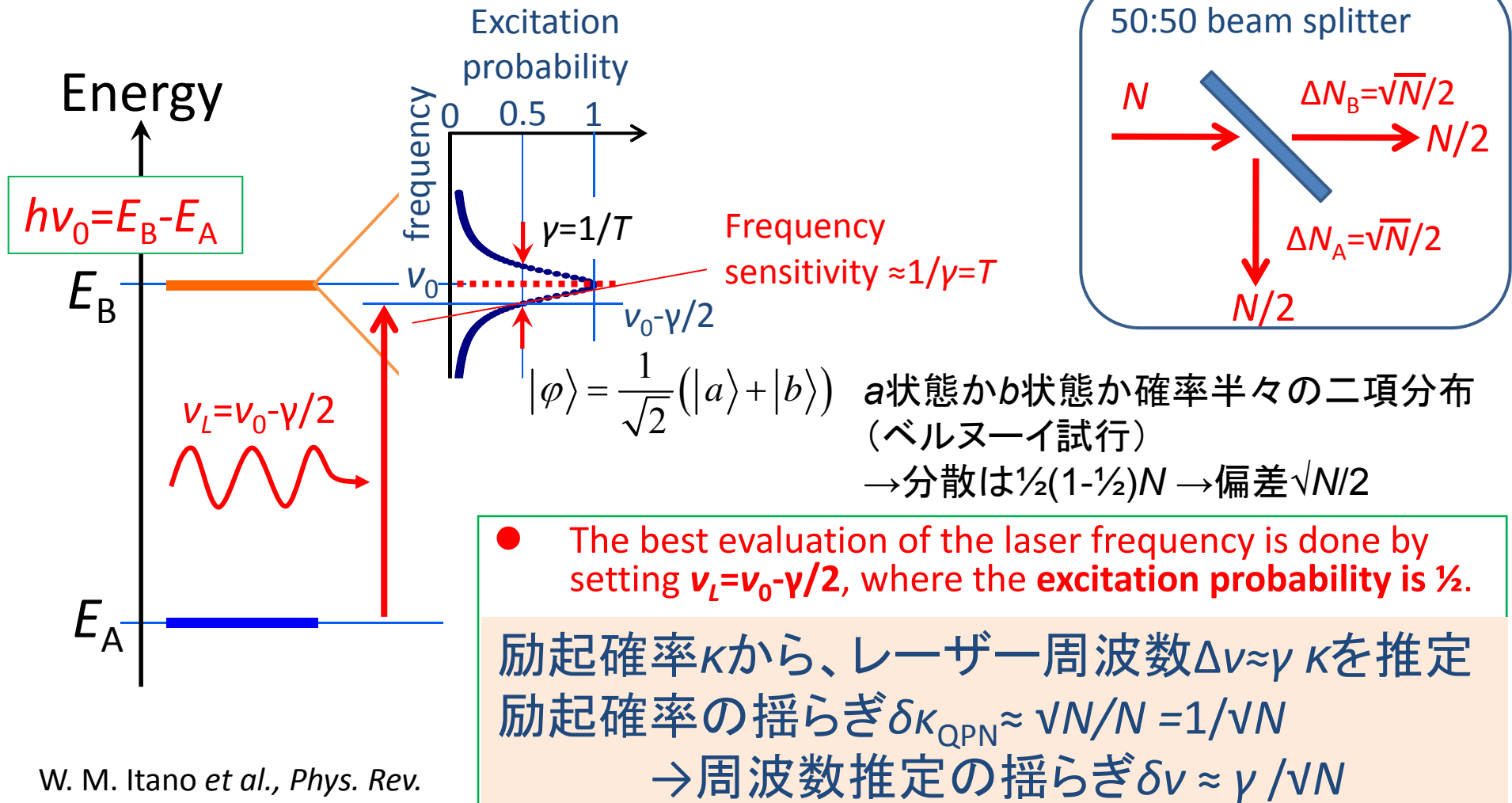
Building Atomic Clocks

- **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



W. M. Itano et al., Phys. Rev. A 47, 3554 (1993).

- The best evaluation of the laser frequency is done by setting $\nu_L = \nu_0 - \gamma/2$, where the **excitation probability is 1/2**.

励起確率 k から、レーザー周波数 $\Delta\nu \approx \gamma k$ を推定
 励起確率の揺らぎ $\delta k_{QPN} \approx \sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N}$
 \rightarrow 周波数推定の揺らぎ $\delta\nu \approx \gamma/\sqrt{N}$

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、目標の不確かさに到達できるか？
- 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

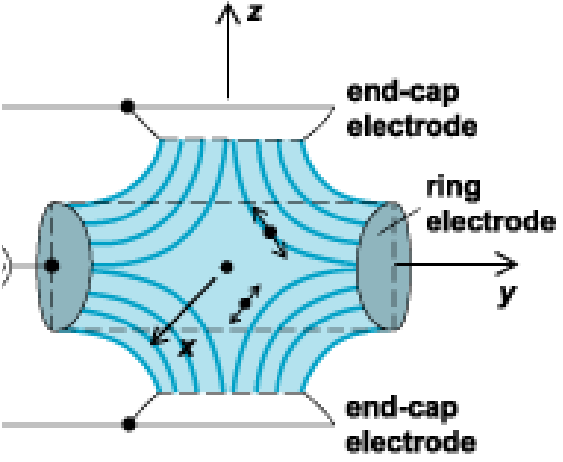
「正確さ」の観点ではポールトラップ中の単一イオンが理想的

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"



The diagram illustrates a Paul trap configuration. It features two end-cap electrodes (top and bottom) and a central ring electrode. A trapped ion is shown at the center, with its motion in the x, y, and z directions indicated by arrows. The z-axis is vertical, the y-axis is horizontal, and the x-axis is along the length of the trap.

Norman F. Ramsey Hans G. Dehmelt Wolfgang Paul

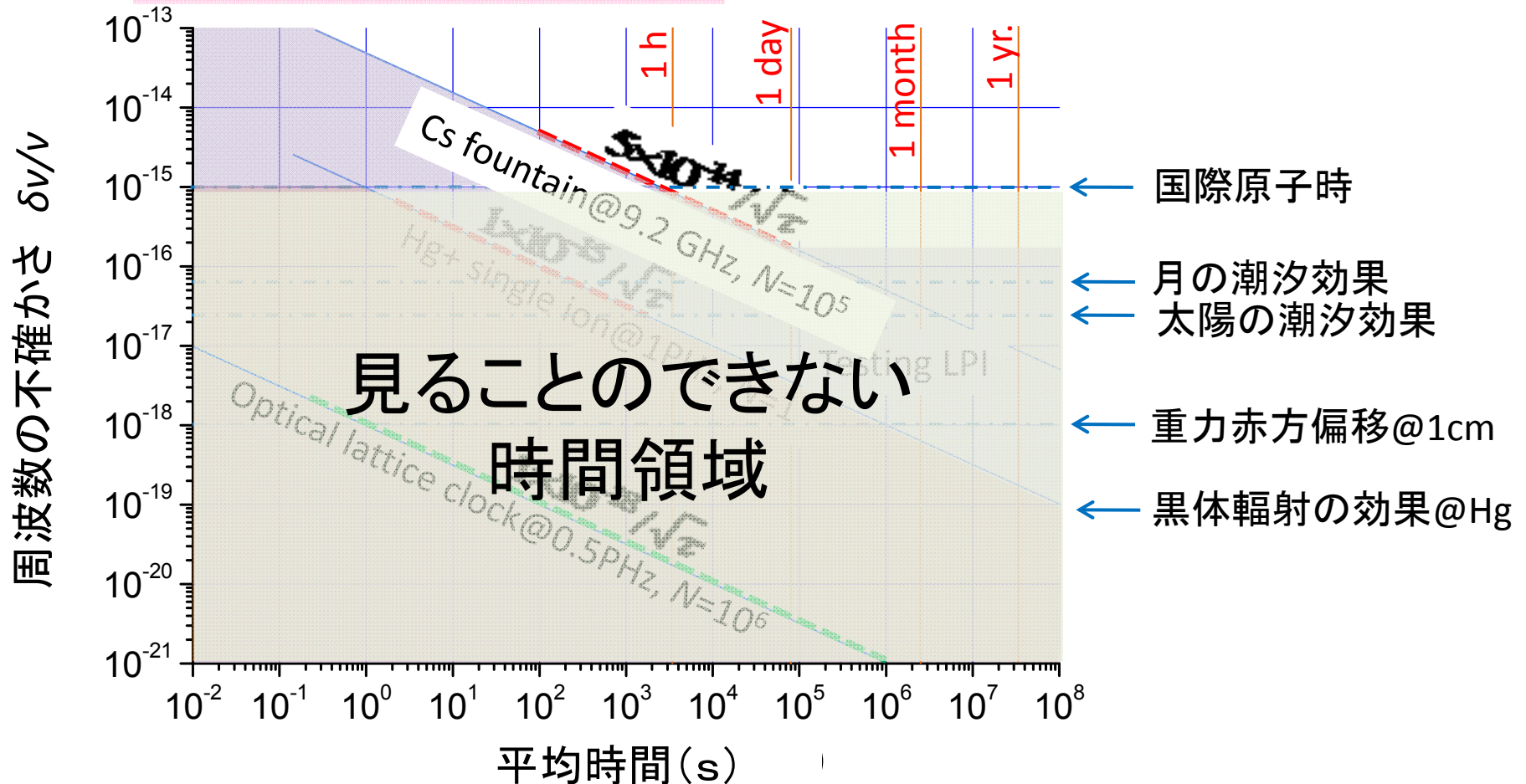
Al⁺ ion optical clock with uncertainty of 7.0×10^{-18} (NIST group 2009.12)¹³

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



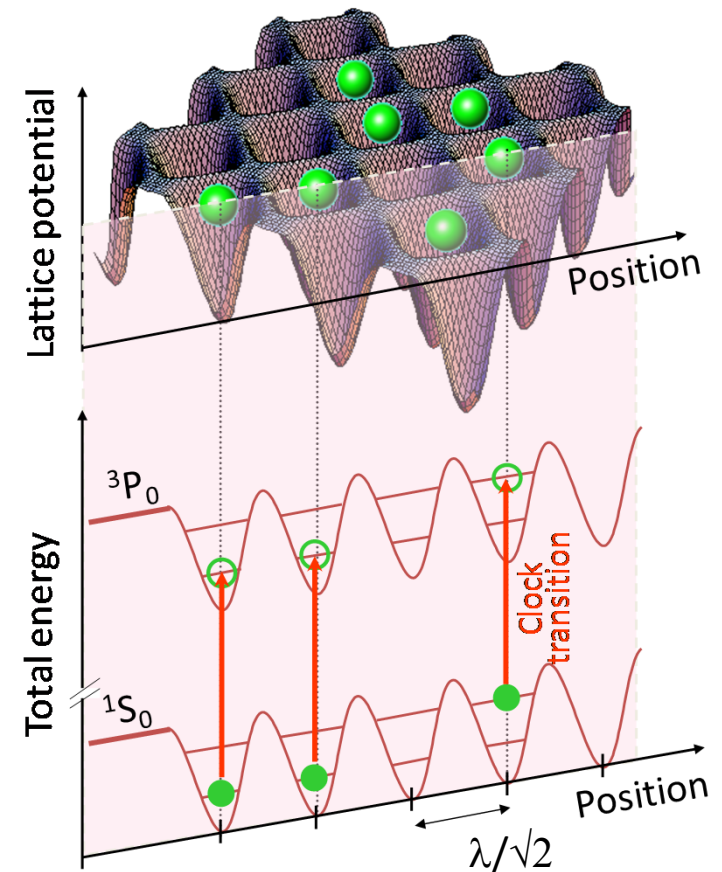
発想の転換：電磁場のエンジニアリング

- 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

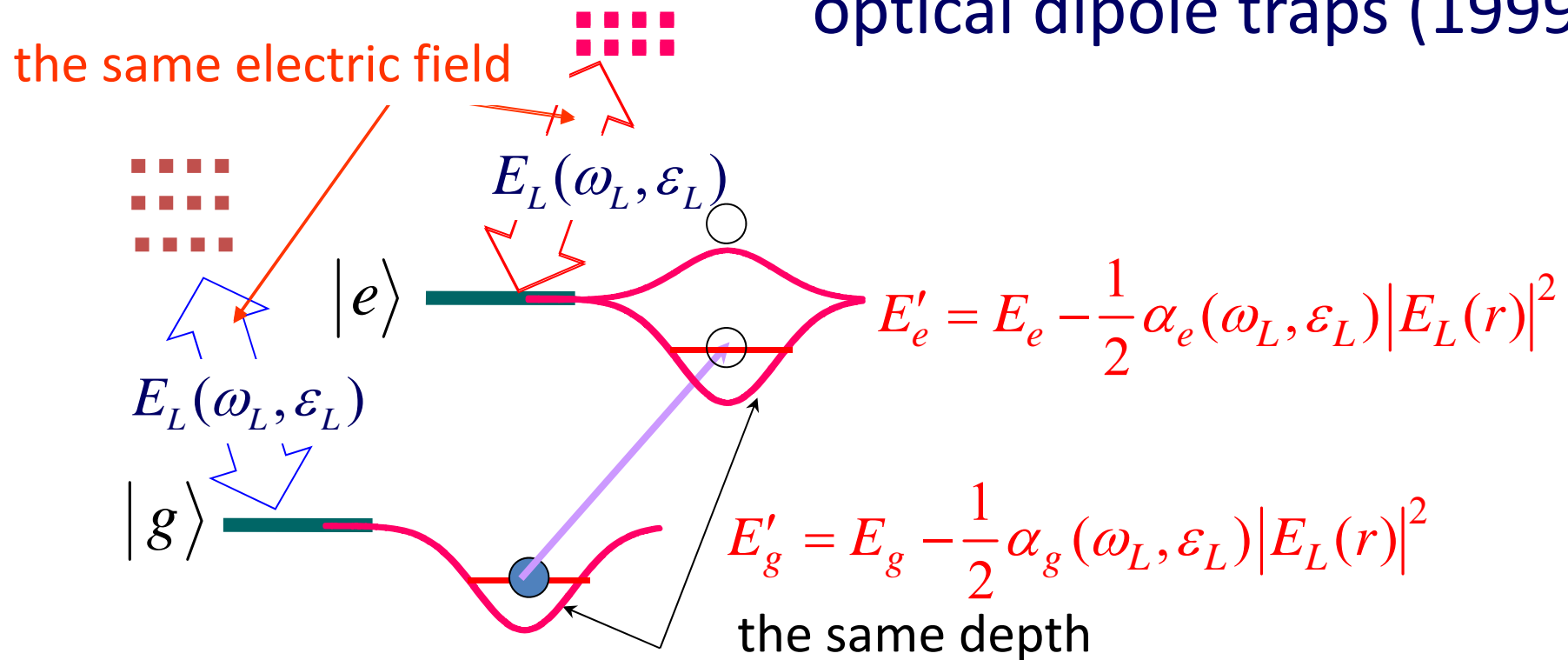
100万個の極低温原子を、レーザー光の干渉縞によってできる光格子に束縛

⇒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！



Elimination of light field perturbation in optical dipole traps (1999)



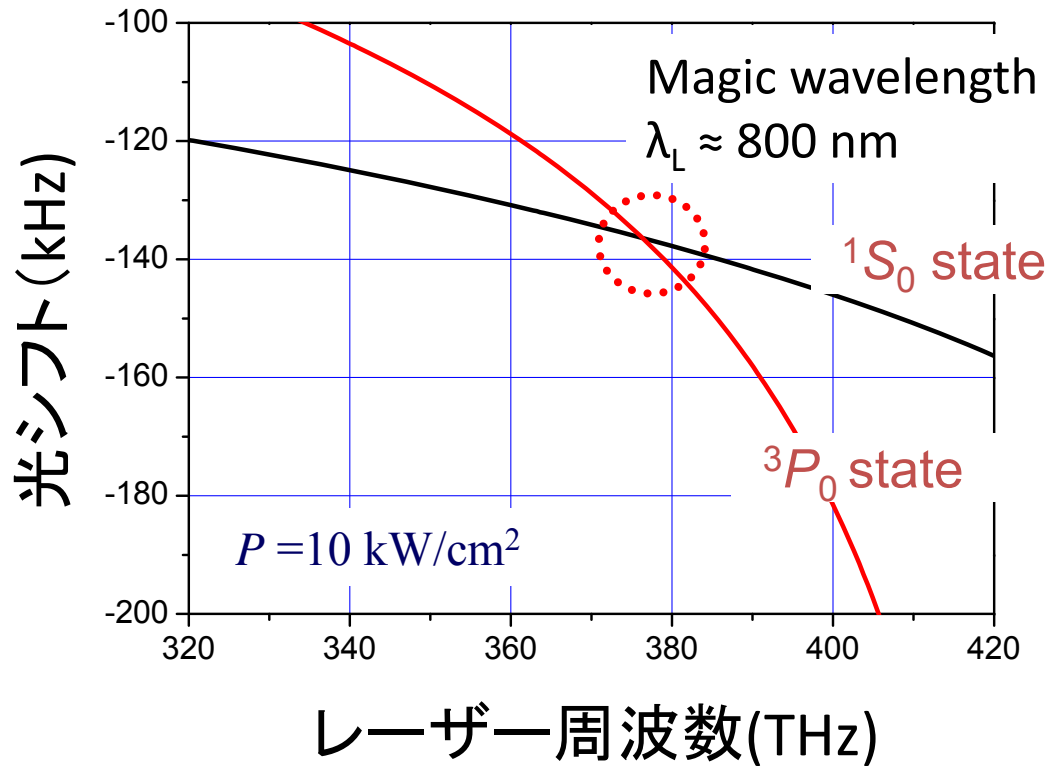
$$h\nu_{\text{atom}} = (E_e - E_g)$$

Light field perturbation can be eliminated, if the “Differential polarizability” is ZERO; “magic wavelength”

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).

光シフトを打ち消す魔法周波数



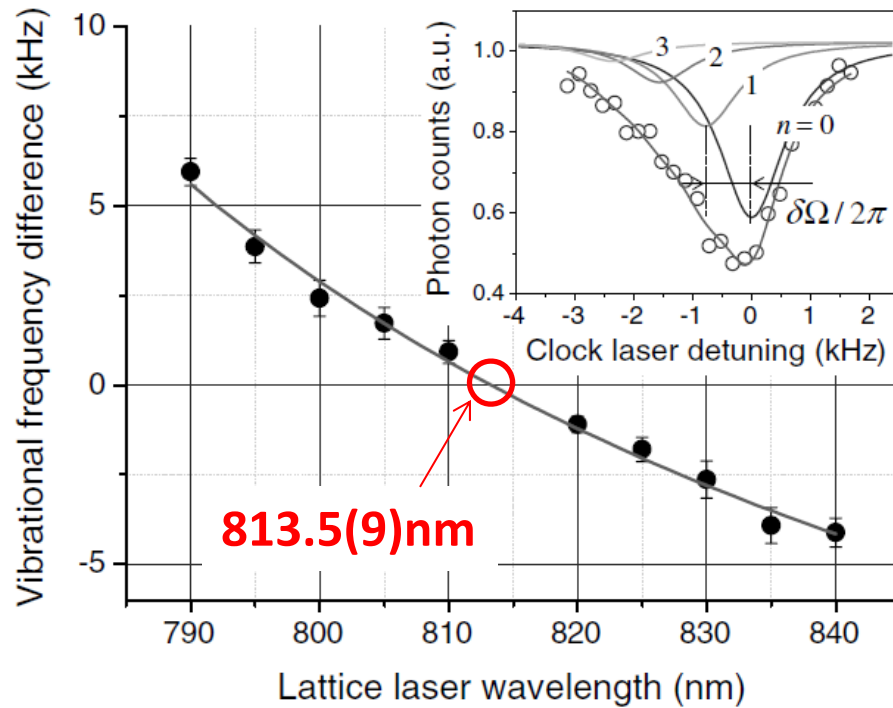
- 周波数だけで、遷移周波数への摂動を制御
- 周波数は9-12桁まで容易に制御可能
- 光シフトの周波数依存性

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

- 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

H. Katori, in The 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology P. Gill, Ed. (World Scientific, 2002), pp. 323-330; Katori, Takamoto, Pal'chikov & Ovisannikov, Phys. Rev. Lett. 91,173005(2003).

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

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

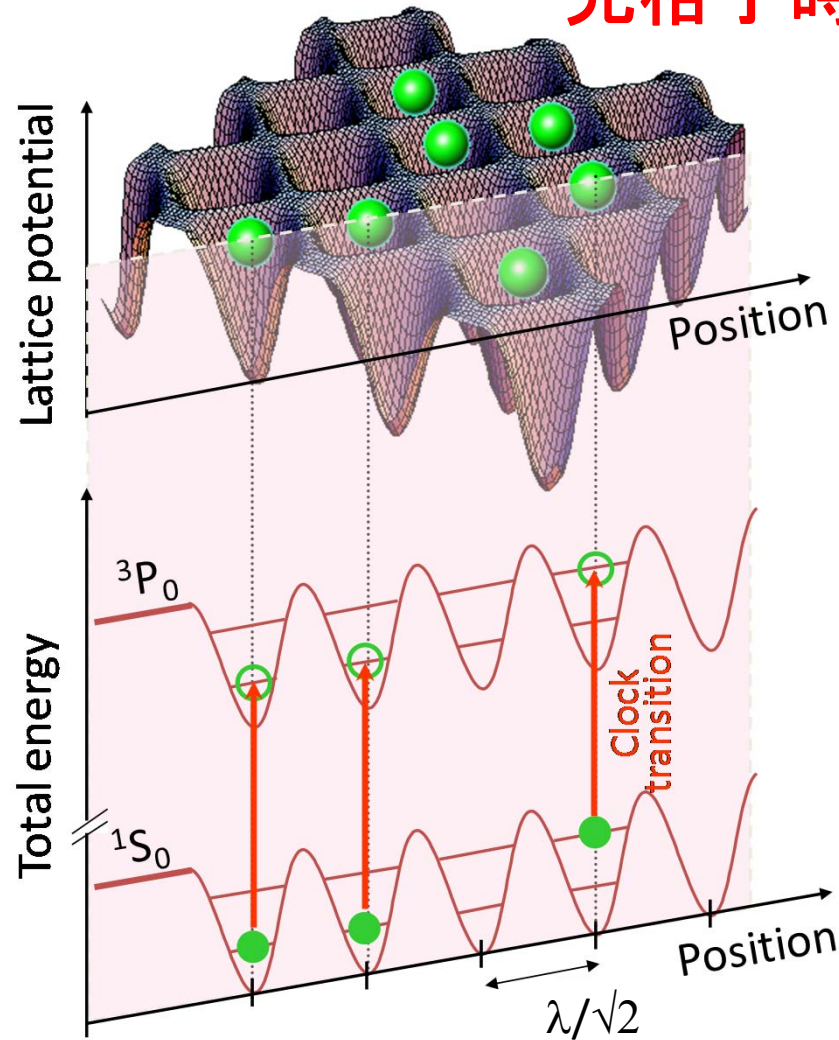
- 18桁精度の実現には、魔法周波数を9桁で決め、プロトコルとして共有

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”

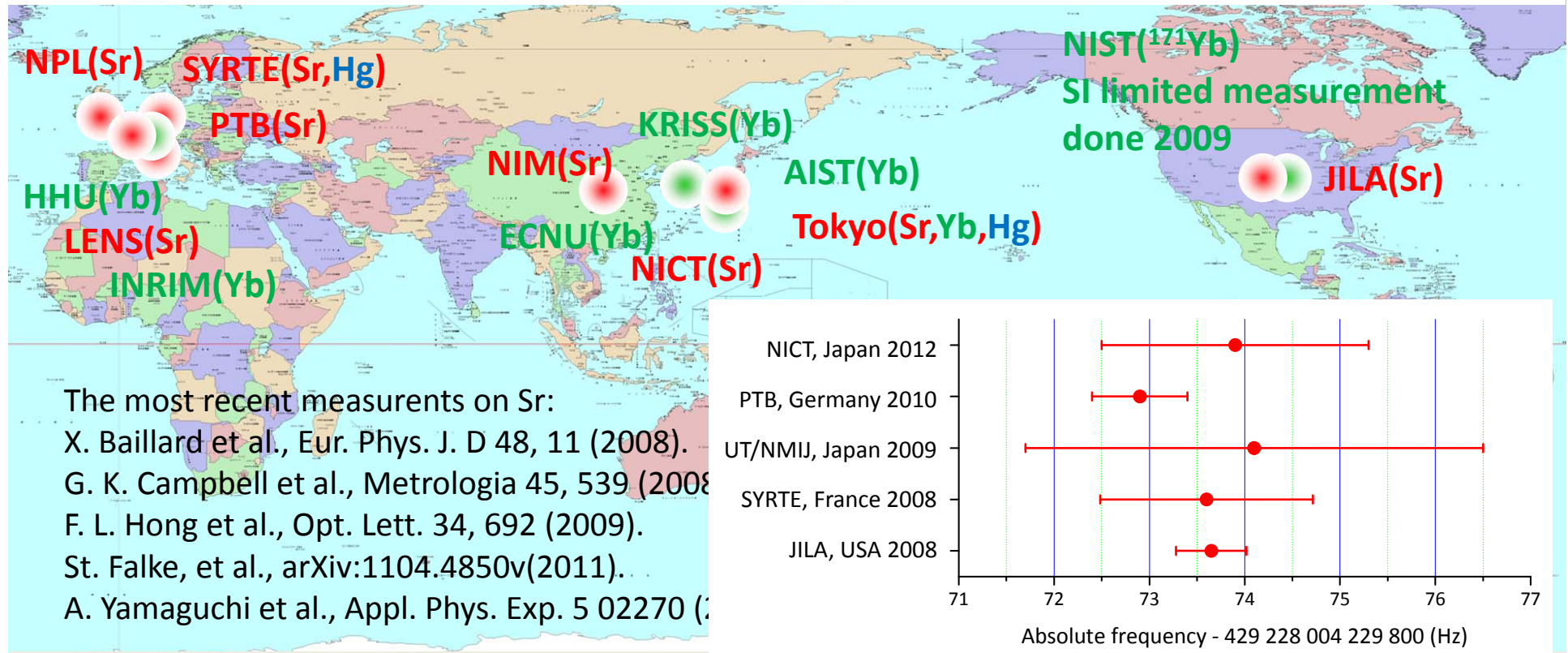


- 周波数だけで、遷移周波数への摂動を制御
- 周波数は9-12桁まで容易に制御可能
- 光シフトの周波数依存性

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

- 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)

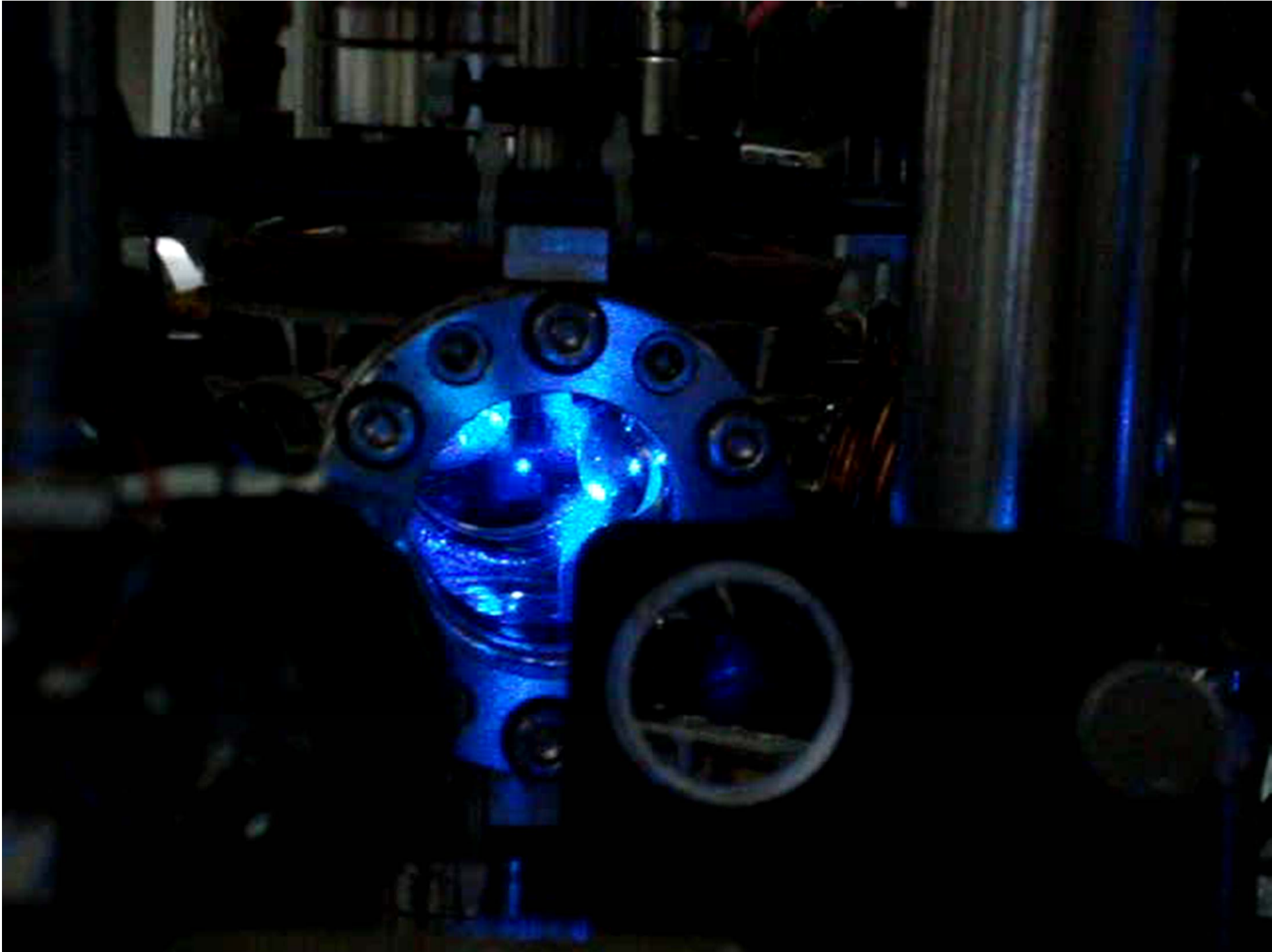


国際度量衡委員会 (2009.10)勧告値

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

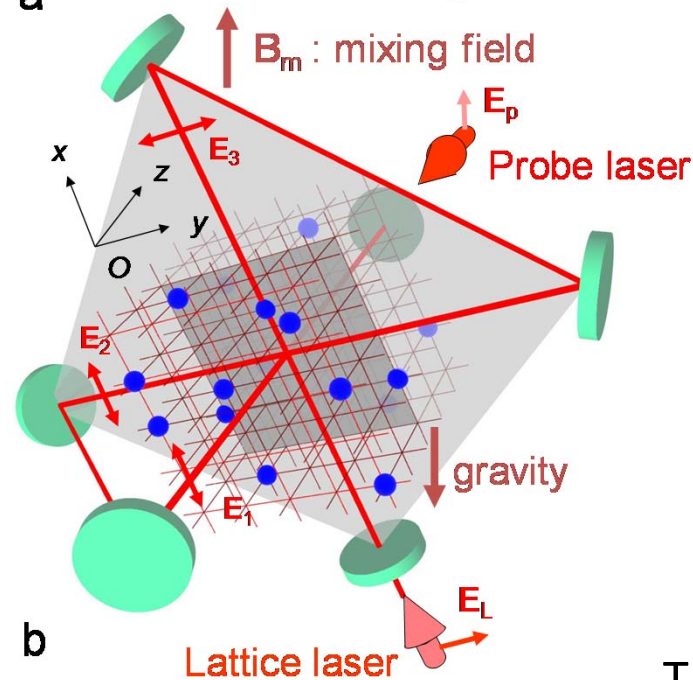
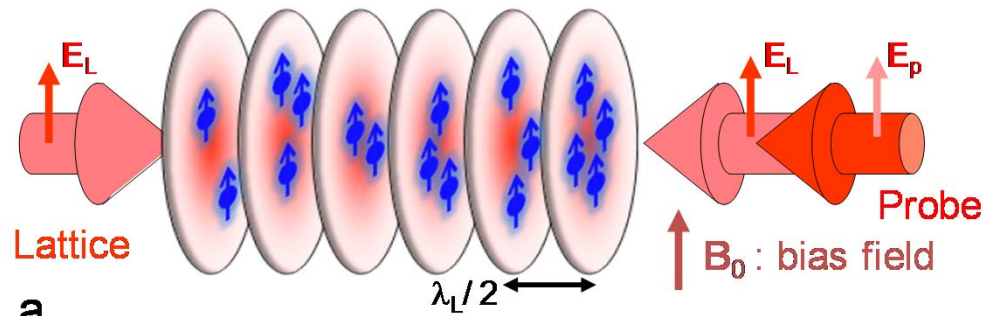
相対的不確かさ 1×10^{-15} → SI秒の不確かさと等価。

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。もう光格子時計同士で、性能を評価する他ない！



光格子時計の最適設計：光格子の幾何学と量子統計

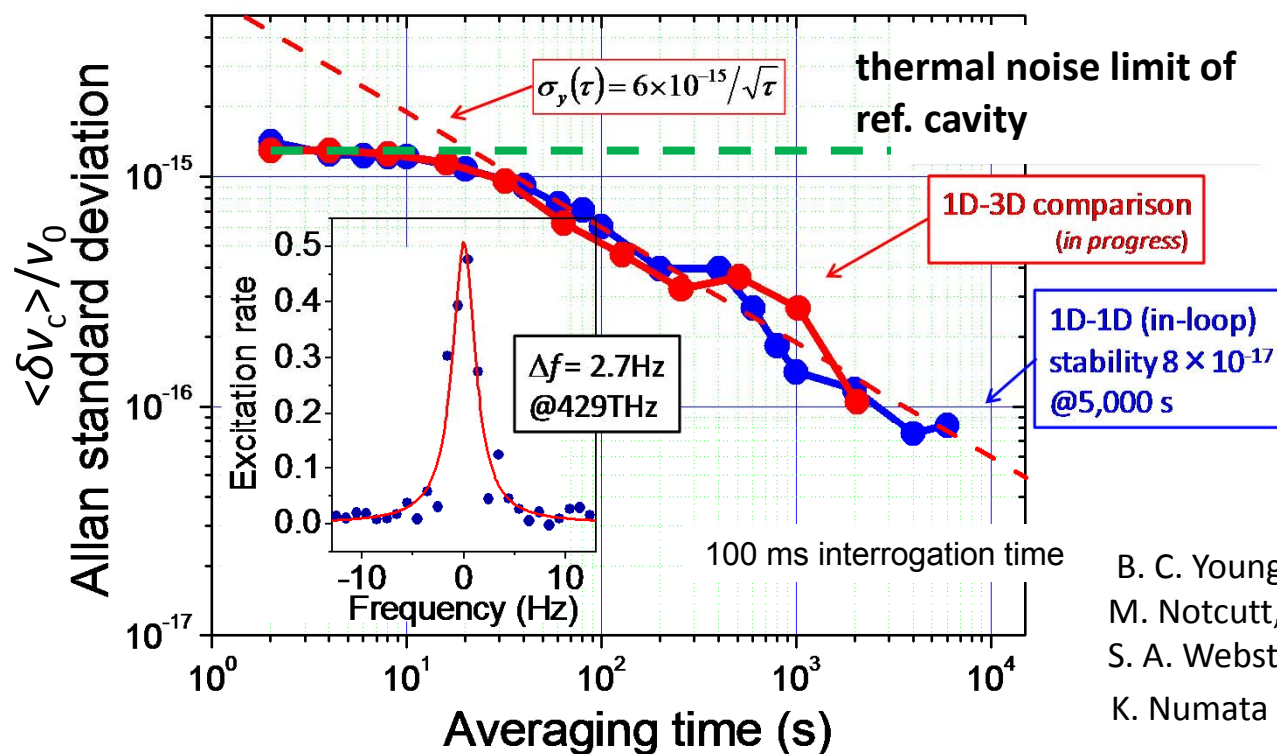
- フェルミ粒子を用いる「偏極1次元光格子時計」
- ボース粒子を用いる「3次元光格子時計」



- 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

レーザーの周波数ノイズに埋もれて原子の量子ノイズ限界の安定度が見えない！



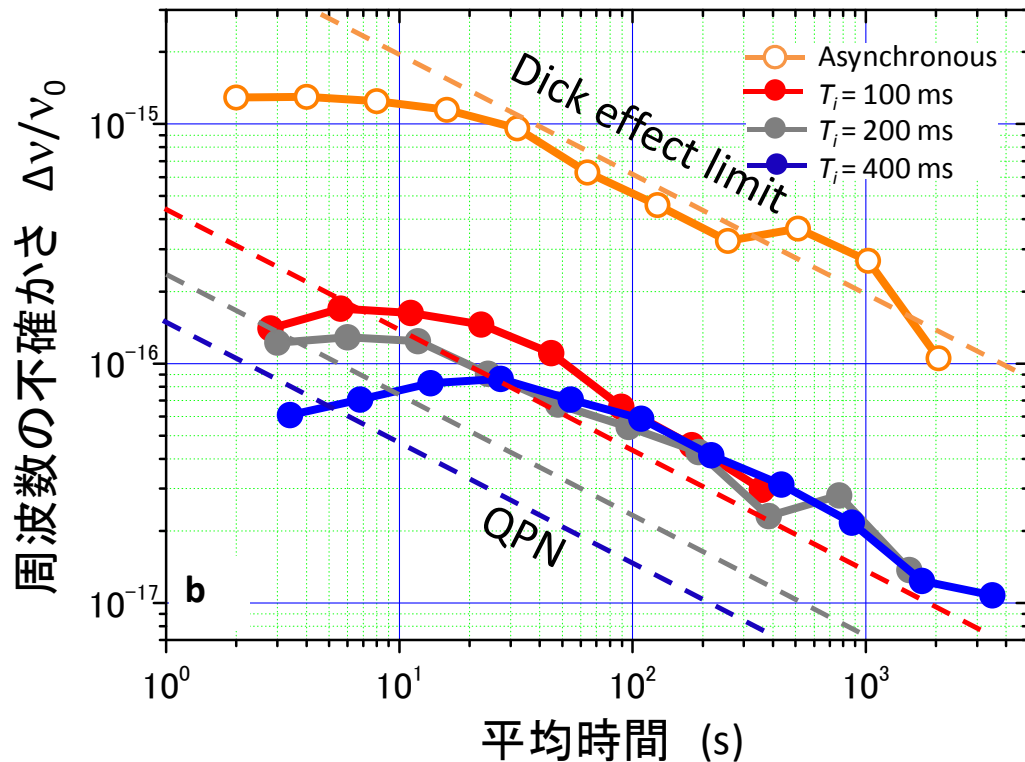
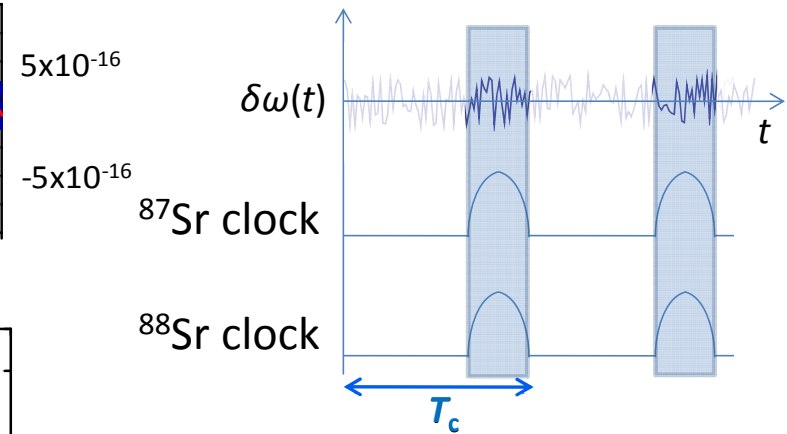
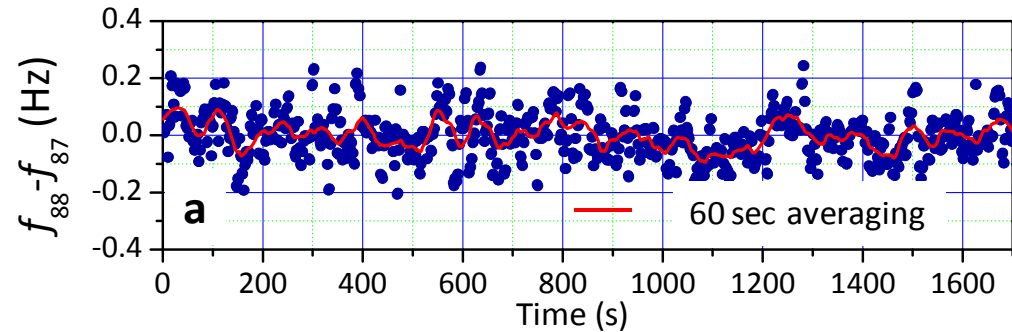
Optical ref. cavity at 300 K

- B. C. Young, et al., Phys. Rev. Lett. 82, 3799 (1999).
- M. Notcutt, et al., Opt. Lett. 30, 1815 (2005).
- S. A. Webster, et al., Phys. Rev. A 75, 011801 (2007).
- K. Numata et al, Phys. Rev. Lett. 93, 250602 (2004).

- 短期(1秒以下)の安定度はレーザーに依存
- 原子をプローブするレーザー周波数が、原子と相互作用する間にも揺らぐ
- 揺らぎの原因はレーザー安定化の参照共振器の熱揺らぎ
- レーザー周波数の評価はこの揺らぎの範囲でしかできない

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).

光時計の研究動向

表1 世界中で行われている原子時計研究。下線はすでに時計遷移の絶対周波数計測が行われている機関。Sr 光格子時計は最多の5研究機関で周波数の一致が検証されている。研究機関数においては Yb 光格子時計がこれに次ぐ。

光格子時計			イオン時計 ~ s						原子核時計
Sr	Yb	Hg	Al ⁺	In ⁺	Ca ⁺	Sr ⁺	Yb ⁺	Hg ⁺	Th
<u>東京大学-NMIJ</u>	<u>NIST</u>	東京大学	<u>NIST</u>	<u>MPQ</u>	<u>NICT</u>	<u>NRC</u>	<u>PTB</u>	<u>NIST</u>	PTB
<u>JILA</u>	<u>NMIJ</u>	<u>SYRTE</u>	PTB	NICT	<u>インスブルック大学</u>	<u>NPL</u>	<u>NPL</u>		THOR-collaboration (米)
<u>SYRTE</u>	KRISS					MIKES			ウィーン工科大学
<u>PTB</u>	INRIM		※アルカリ土類原子様イオン 超微細混合 ¹ S ₀ - ³ P ₀ 遷移		※アルカリ原子様イオン S-D 電気四重極子遷移				~ 10⁴ s
<u>NICT</u>	デュッセルドルフ大学		20s		Yb ⁺ では S-F 電気八重極子遷移も観測				
NMIJ	ECNU								
NPL									
NIM					励起状態寿命 τ ~ several yr.				
フィレンツェ大学									

- 研究のターゲットは、実験環境(レーザーの性能)とアイデア次第でどんどん変化する
- 分光線幅 $\gamma \sim 1/\tau$ とレーザースペクトル幅 $\delta\nu$ が同程度なら光シフトが少ない
- Al⁺、光格子時計は2001年のFMS会議で提案された
- YbのE3遷移の時計も同会議で報告されたが、あまり有望には見えなかった
- 2000年代前半に一世を風靡するかに見えた、イオンの四重極遷移は色褪せた
- 18桁のエラーバジェットが作れないと勝負にならない

時計をつなぐと面白い物理が見えてくる

—時計と重力

- 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？

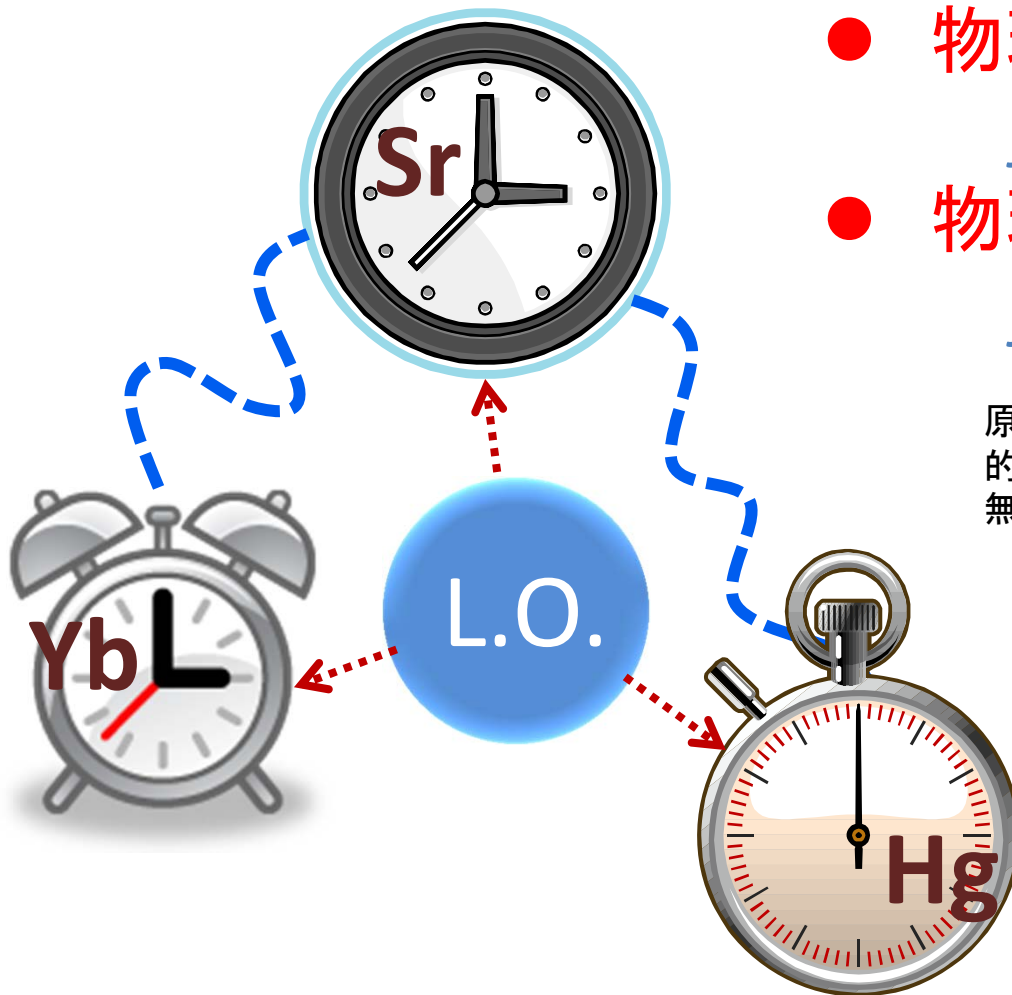
$$f[\text{Hg}(\alpha(U_g))]/f[\text{Sr}(\alpha(U_g))]$$

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

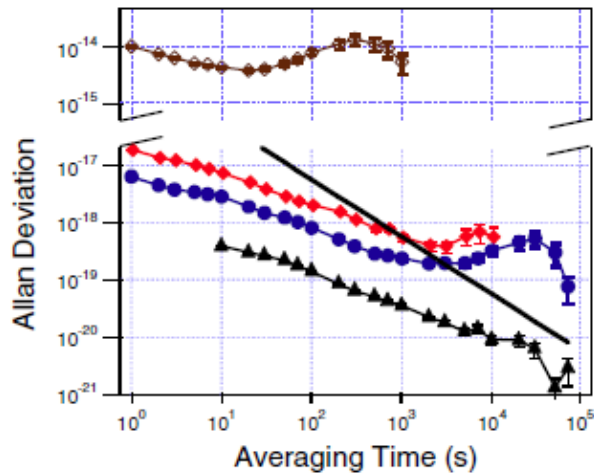
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137.036}$$

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



PRL 99, 153601 (2007)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 OCTOBER 2007

Coherent Optical Phase Transfer over a 32-km Fiber with 1 s Instability at 10^{-17}

Seth M. Foreman,¹ Andrew D. Ludlow,¹ Marcio H.G. de Miranda,¹ Jason E. Stalnaker,² Scott A. Diddams,² and Jun Ye¹

**USA,
Boulder**

LETTERS

Coherent optical link over hundreds of metres and hundreds of terahertz with subfemtosecond timing jitter

I. CODDINGTON¹, W. C. SWANN¹, L. LORIN², J. C. BERGQUIST¹, Y. LE COQ³, C. W. OATES¹, Q. QURASHI¹, K. S. FEDER⁴, J. W. NICHOLSON⁴, P. S. WESTBROOK⁴, S. A. DIDDAMS¹ AND N. R. NEWBURY^{1*}

Europe

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

AIST-U. of Tokyo: 120 km

Japan

H. Jiang et al., J. Opt. Soc. Am. B 25, 2029 (2008).

SYRTE-LPL: 86x2 km

A. Pape et al., Opt. Express 18, 21477 (2010).

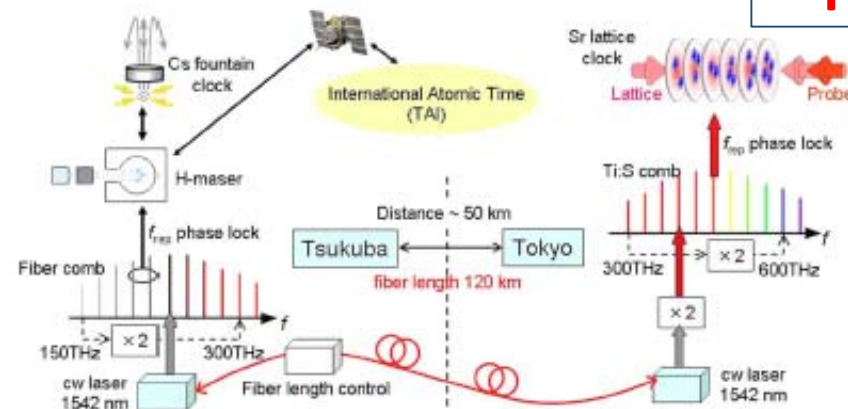
PTB-IQ(LUH): 73 km

O. Lopez et al., Opt. Express 18, 16849 (2010).

Use of Internet fiber

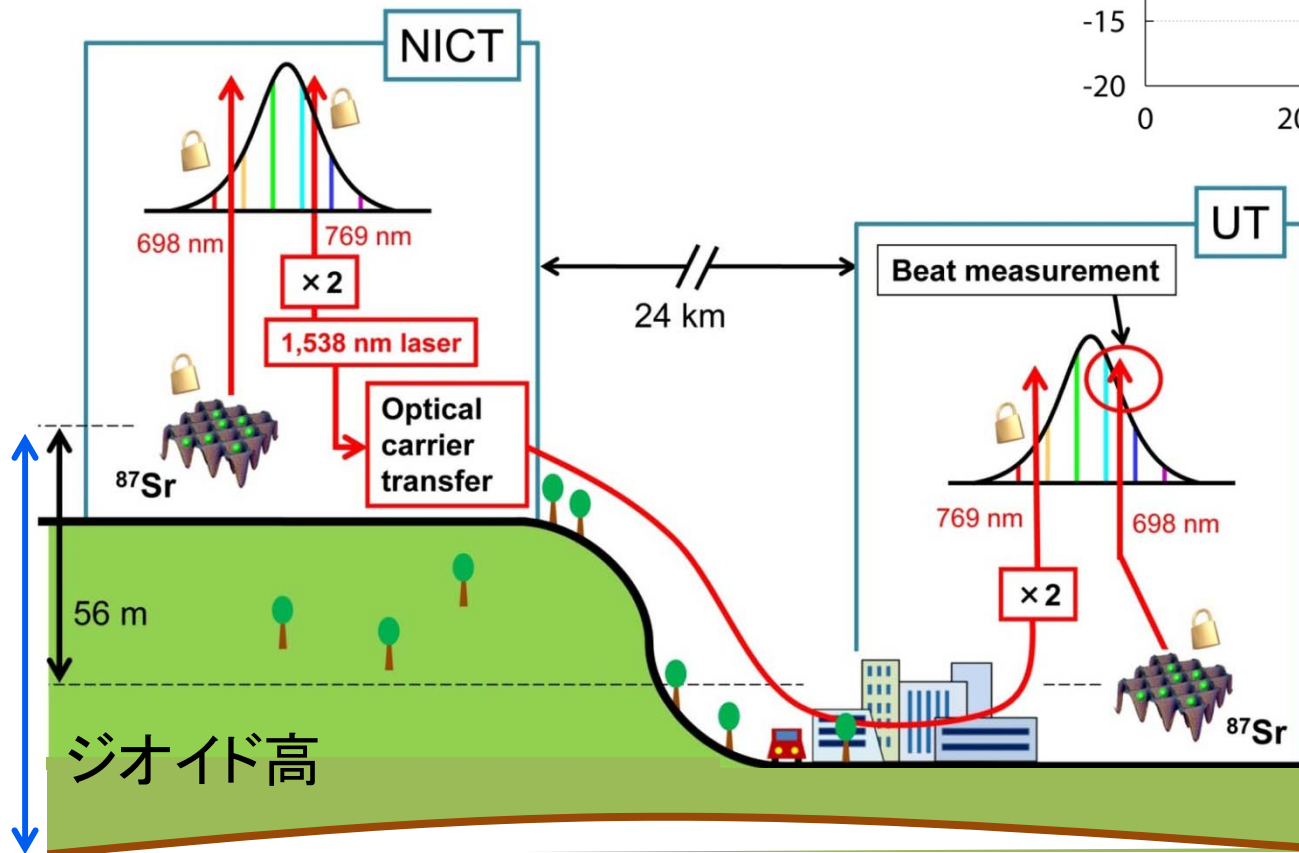
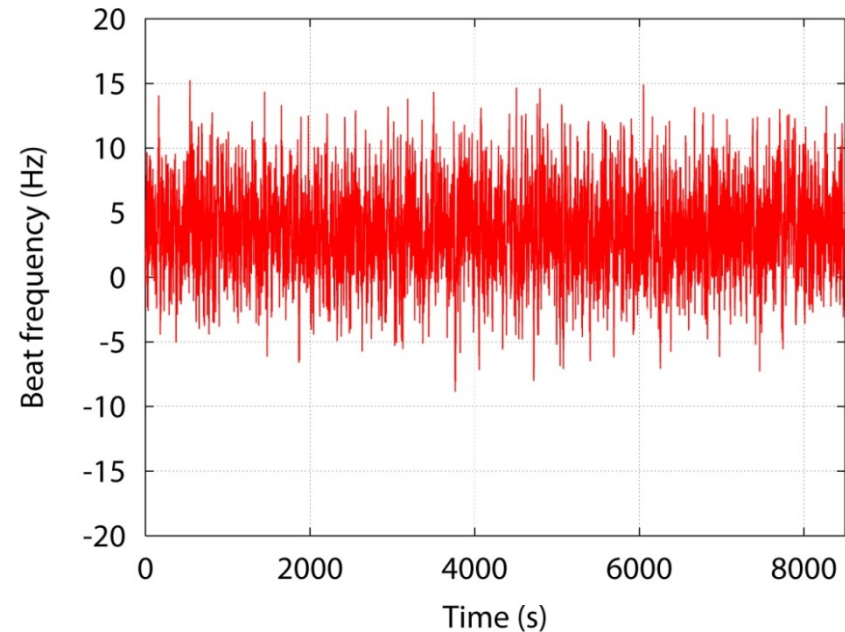
K. Predehl et al., Science 336, 441 (2012).

MPQ-PTB: 920 km



遠隔地間の時計比較

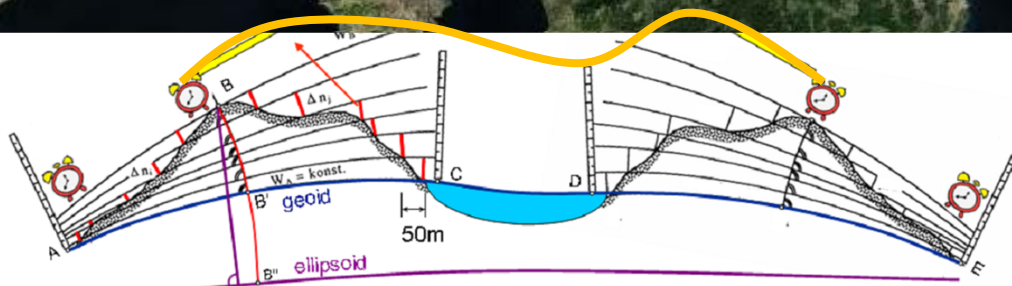
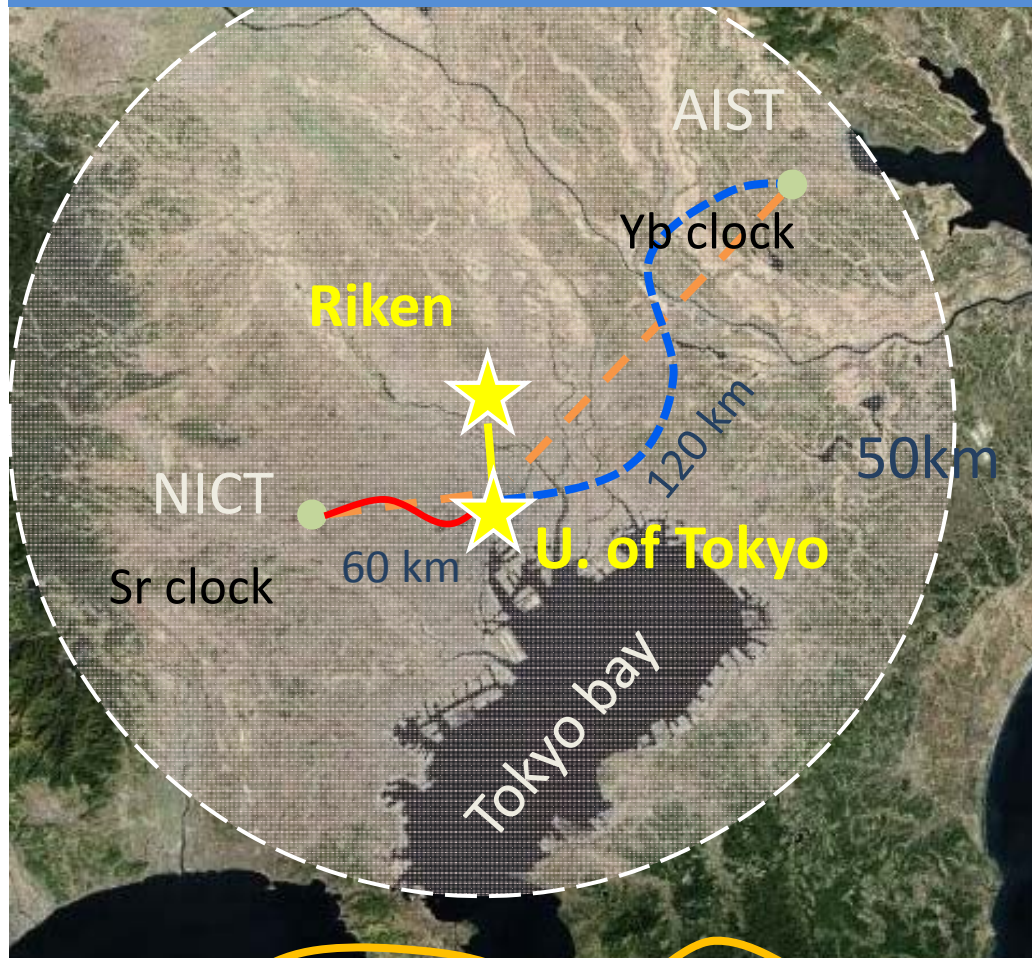
- 重力シフト (2.6Hz) の実時間測定
- SI秒を介さない2機関の光格子時計の直接比較 $\frac{\nu_{\text{NICT}} - \nu_{\text{UT}}}{\nu_0} = 0.9(7.3) \times 10^{-16}$



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...

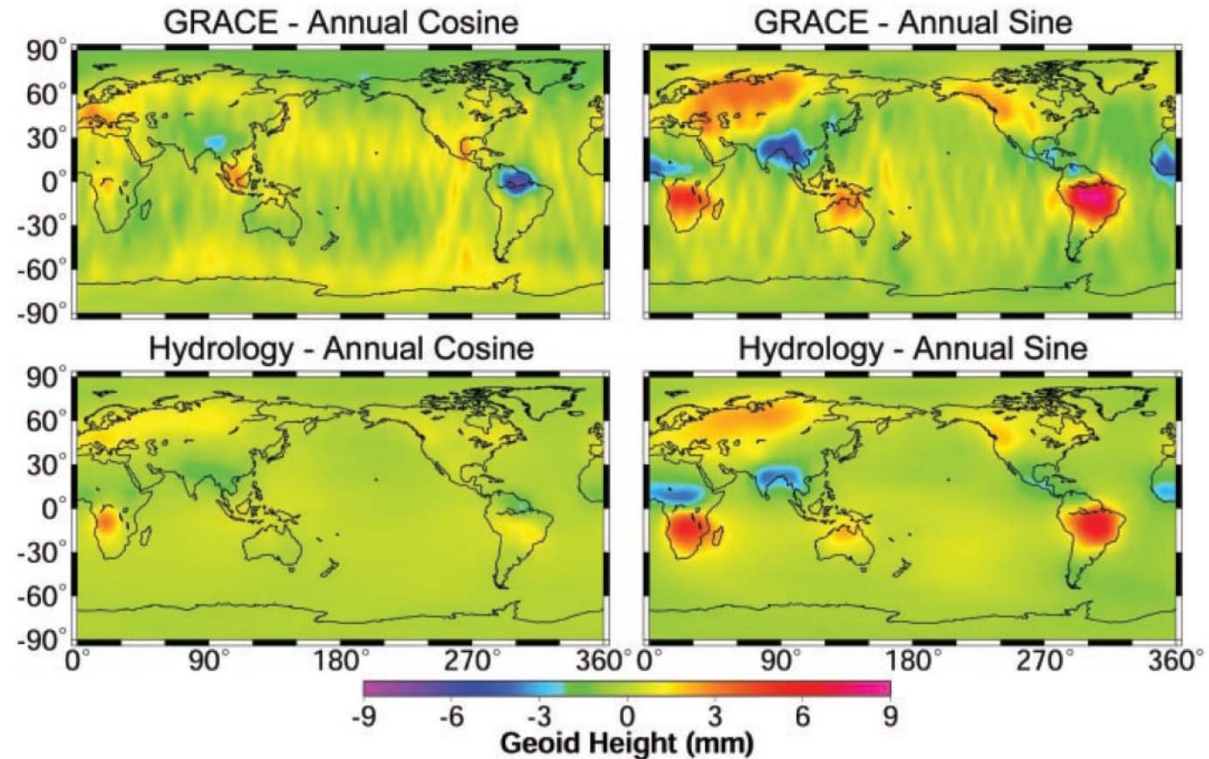
本郷・和光の周波数差(ジオポテンシャル差)
1.234 Hz

水曜日
14
2011 12月

9°
東京都 東京
2時間前



←光格子時計の周波数差を ガジェットに追加・更新間隔100秒で 1cmのジオイド差を測定

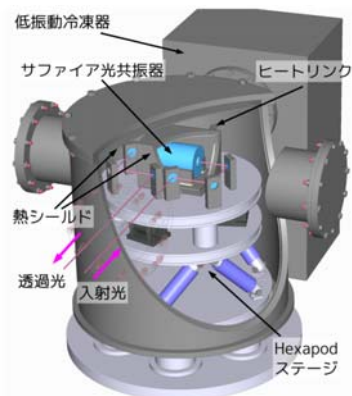


Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellites
2台の衛星をテストマスにして重力場を図る
時間分解能1ヶ月, 空間スケール数1000km程度

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?

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

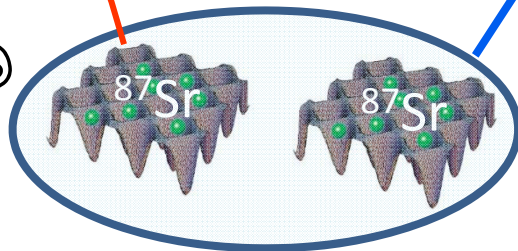
No Dead time operation:
highly stable clock utilizing stable L.O.



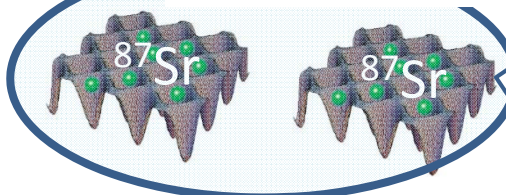
Cryogenic Sr clock @70K

Fiber link @10⁻¹⁷-10⁻¹⁸

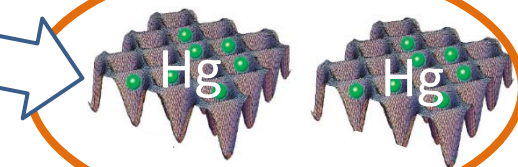
Cryogenic Sr clock @70K



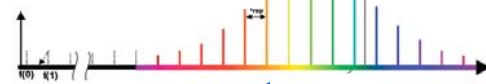
Cryo-Sr@70K



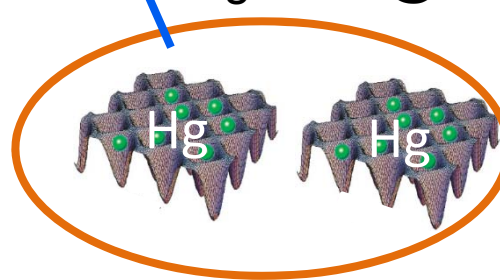
Hg @RT



$f_{\text{Hg}}/f_{\text{Sr}}@10^{-17}$



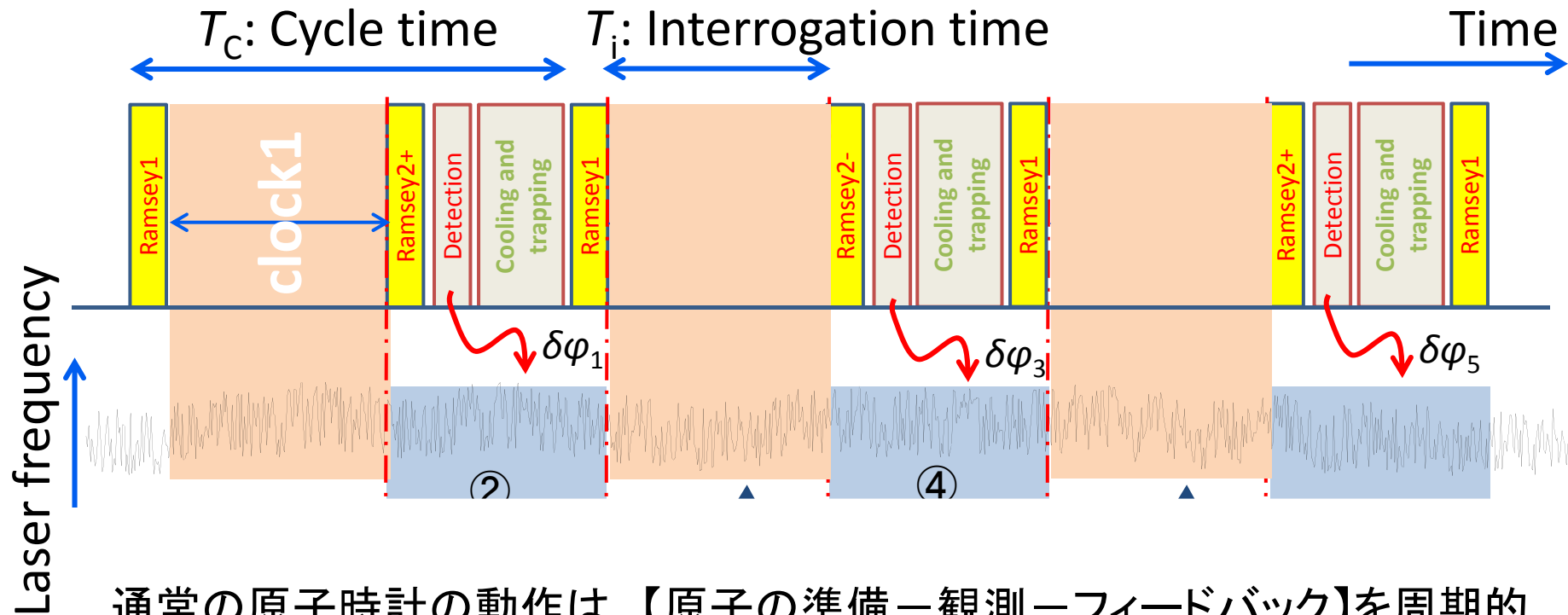
Hg clock @RT



Sync. operation to evaluate 10⁻¹⁷-10⁻¹⁸



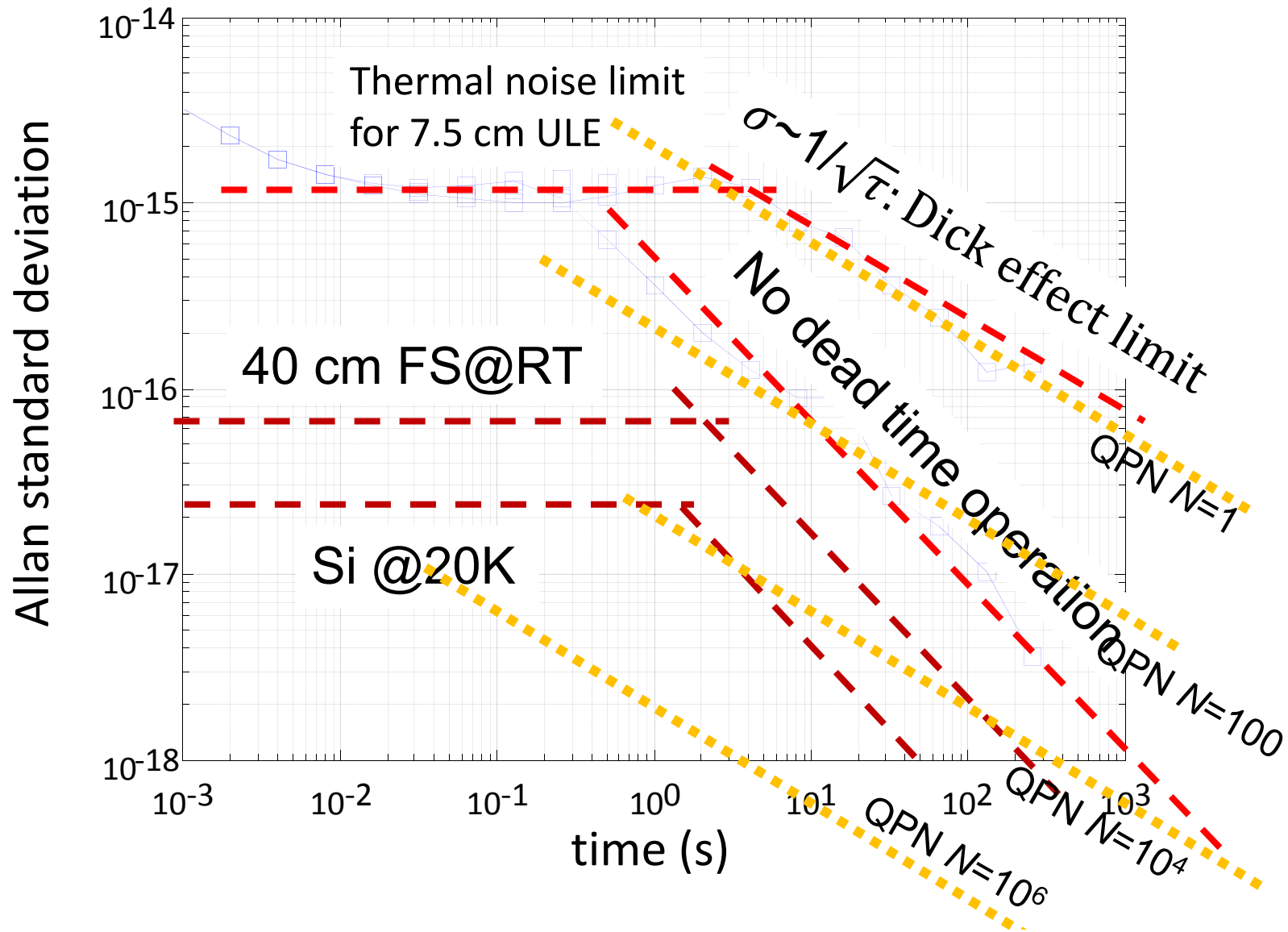
No dead time operation of clocks



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



18桁の精度をもつ究極の光格子時計を目指して

Yb

Si

光

- 光格子時計の提案と実現
- 17桁の測定の目処はたった

— 正確すぎて正確でなくなる新しい時間の概念 —

- 異種原子比較による物理定数の恒常性
重力との結合の有無、...の検証
- ジオイド面の揺らぎで共通の原子時の維持は不可能、時間はローカル、測地学の新たなツール、サイエンスへ

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.

