


## ■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。  
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

**\*** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

**CC** : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義  
Copyright 2012, 香取秀俊

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series  
Copyright 2012, Hidetoshi Katori

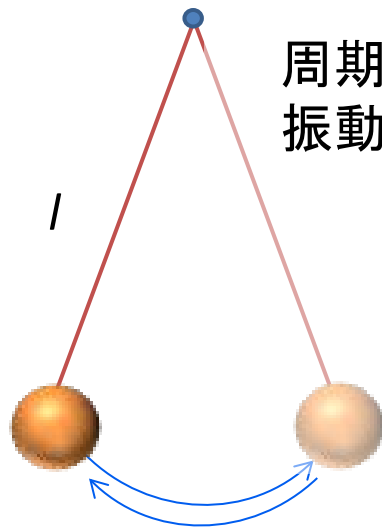
2012年度冬学期  
学術俯瞰講義 光の科学  
駒場キャンパスKOMCEEレクチャーホール

# 第6回(11/15) 時間を極める

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻  
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

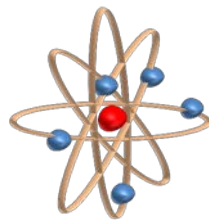
香取秀俊

# どうやって時間を認識する？

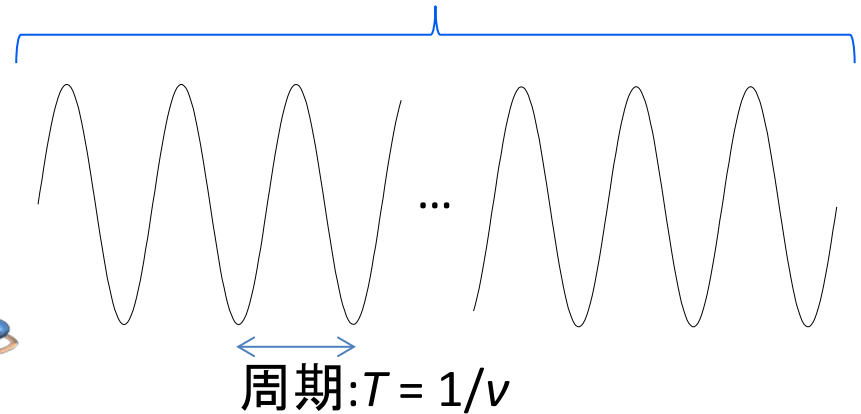


周期:  $T=2\pi\sqrt{l/g}$   
振動数:  $\nu=1/T$

$^{133}\text{Cs}$ 原子



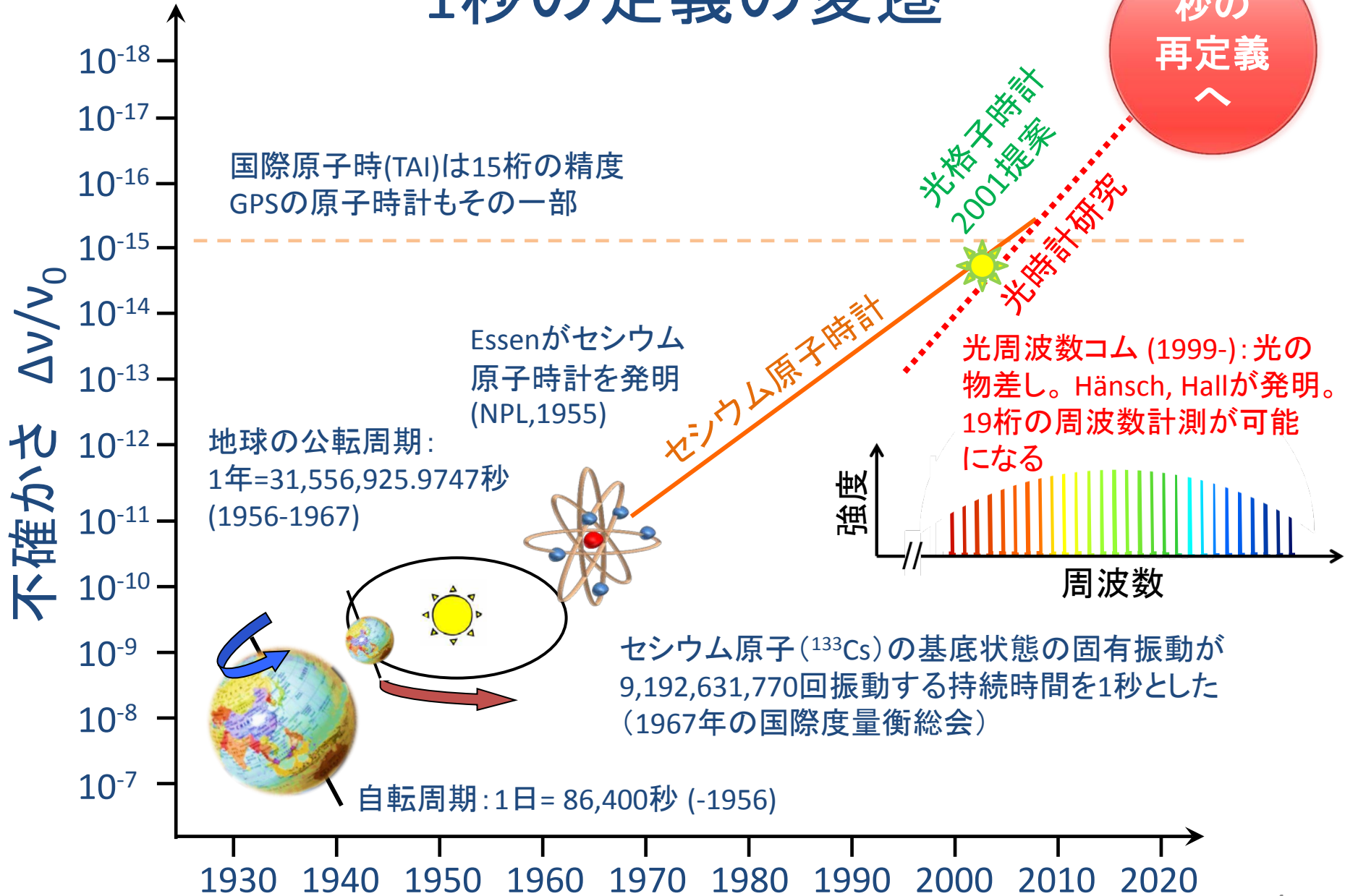
$\nu = 9\,192\,631\,770$  回振動すると1秒



- 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  $\delta T$  狂うと、時間も  $\delta t = n \cdot \delta T$  だけ狂う  
→ 時間の(相対)精度:  $\delta t/t = \delta T/T = \delta \nu/\nu$
- これから時計精度  $\delta t/t$  を振り子の**周波数精度**  $\delta \nu/\nu$  で読み替える
- $\delta \nu/\nu = \delta t/t = 10^{-18}$  なら、 $\delta t/t = 1$  秒/300億年、つまり300億年(宇宙の年齢137億年)で1秒の誤差の時計作りを目指そう!

# 1秒の定義の変遷

秒の  
再定義  
^



# 原子時計研究はなぜ面白い？

- 原子時計の精度
  - あらゆる物理計測の中で桁違いの高精度を誇る
  - 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)
- 極限的な精度で**物理の根幹**に迫る
- 工学的にもきつと役立つ
  - 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

# 時間を制すること

→欧米社会では、国家戦略の中枢を担ってきた

- 時の掌握は権力の象徴、ナイルの氾濫や日食の予言
  - 天文学者は王の側近として、その権力維持を支えた
- 大航海時代、イギリス議会在時計開発に多額の懸賞金
  - ハリソンのクロノメータ(1736)は航海の安全を確保。大英帝国隆盛の源
- 科学の言葉はSI単位(System International)、フランスのメートル法(1790)以来フランス語で語られる
  - 例えば、TAI=temp atomic international(国際原子時)
- 米国防総省の管理するGPS衛星は軍事衛星(1978-)大韓撃墜事件を機に民生利用に開放
  - ヨーロッパ、ロシア、中国、独自の測位衛星の整備を進める

著作権の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました。

朝日新聞

2012年10月18日朝刊31面

「前原宇宙担当相、準天頂衛星7機に意欲 有人飛行は慎重」

原子時計でできたこと

# GPSカーナビのしくみ (Global Positioning System)

# 光速度不変の原理

アインシュタイン: 1905年に特殊相対性理論を発表 「質量、長さ、同時性は、観測者のいる慣性系によって異なる相対的なものであり、唯一不変なものは光速度 $c$ のみである」

光速度  $c \equiv 299,792,458 \text{ m/s}$   
は定義値となった

長さの定義:

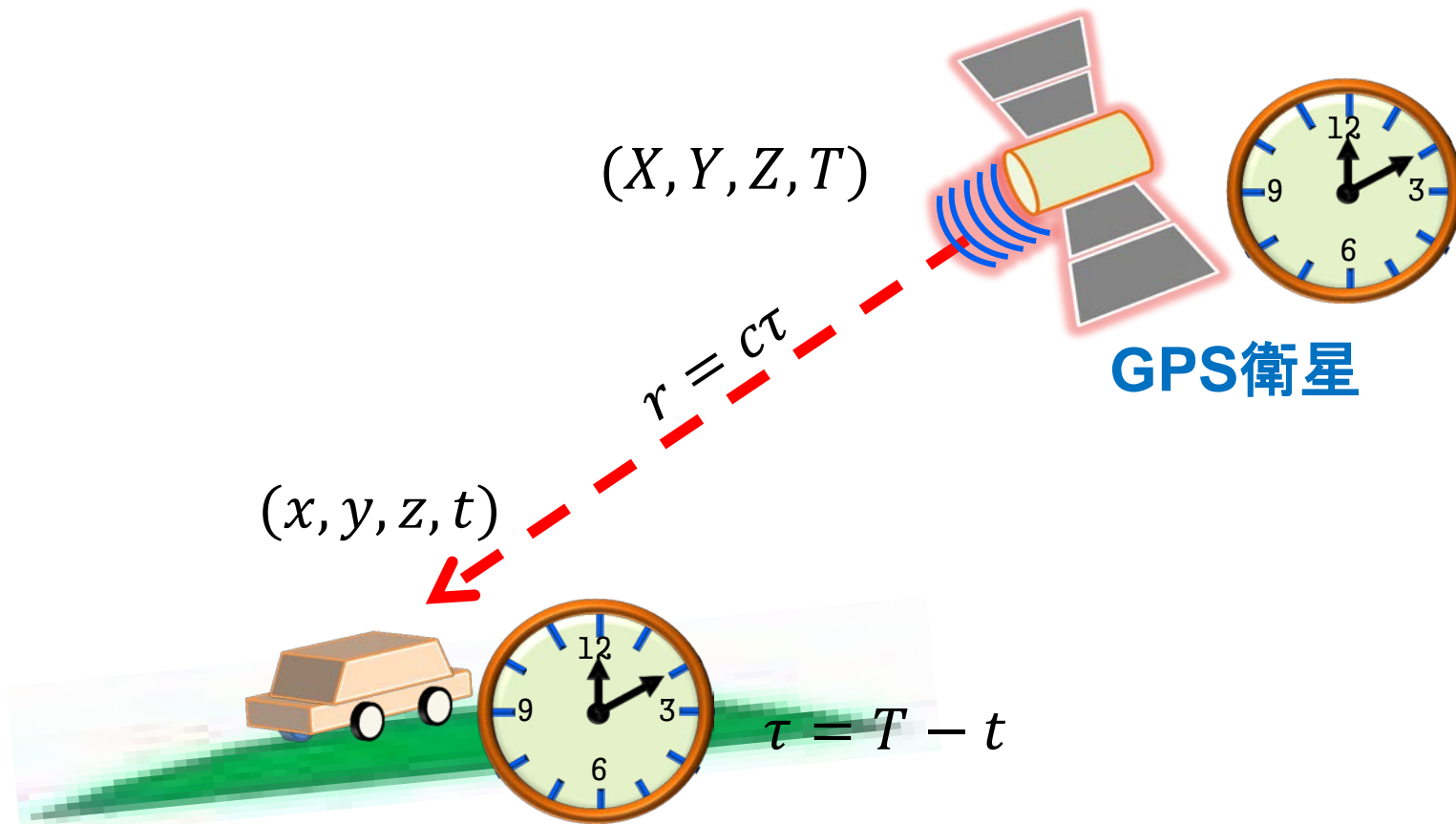
1m=光が $1/299,792,458$ 秒に進む距離  
(1983年の国際度量衡総会)

→測位は時間計測と等価

(距離) = (光の速度) × (時間)

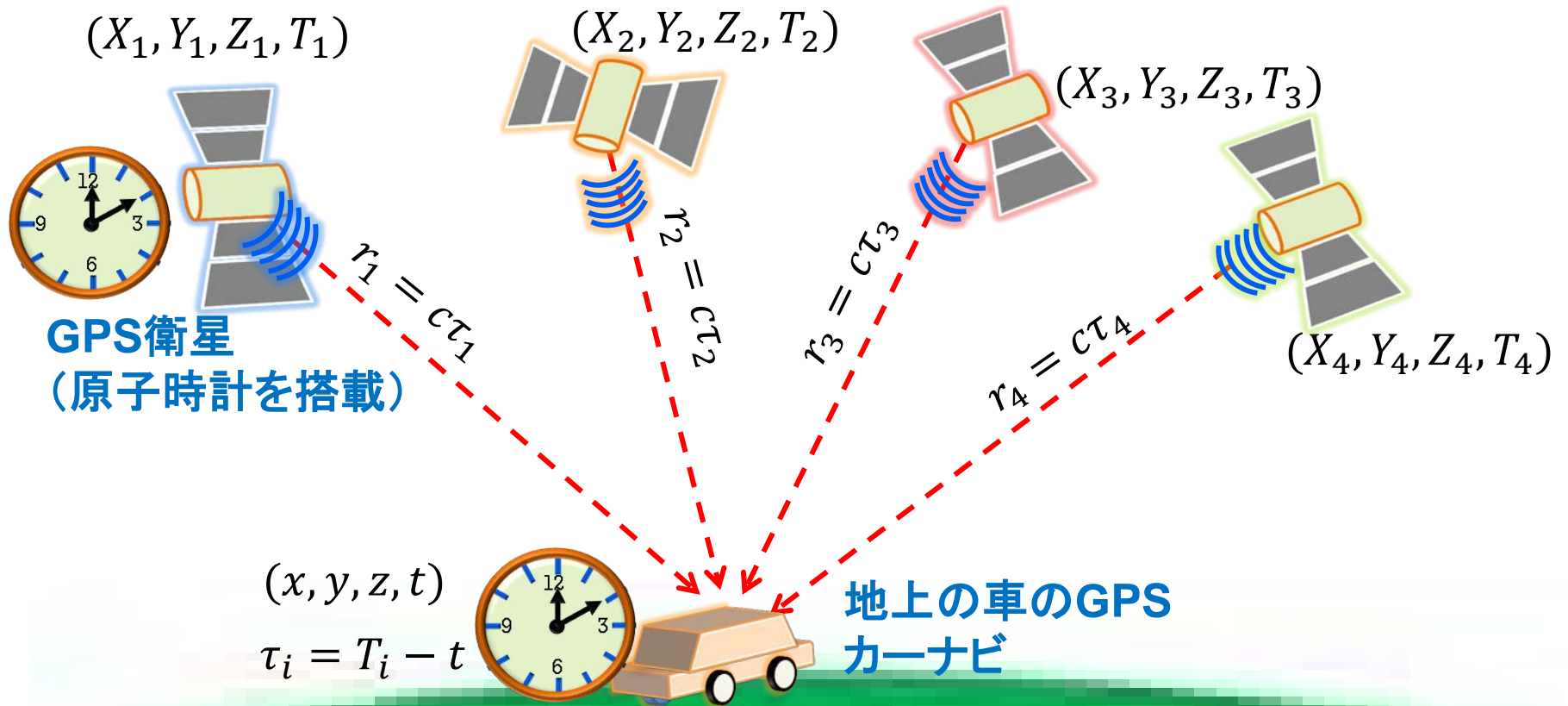
# GPSカーナビの仕組み

GPS衛星と受信機がともに正確な時計をもっていれば、送信時刻と受信時刻の差 $\tau$ に光の速度 $c$ を掛けて距離 $r$ が求まる



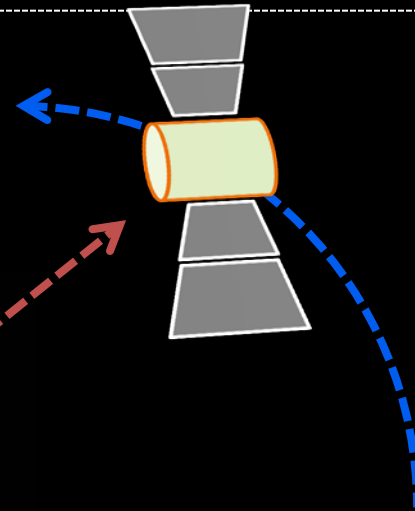
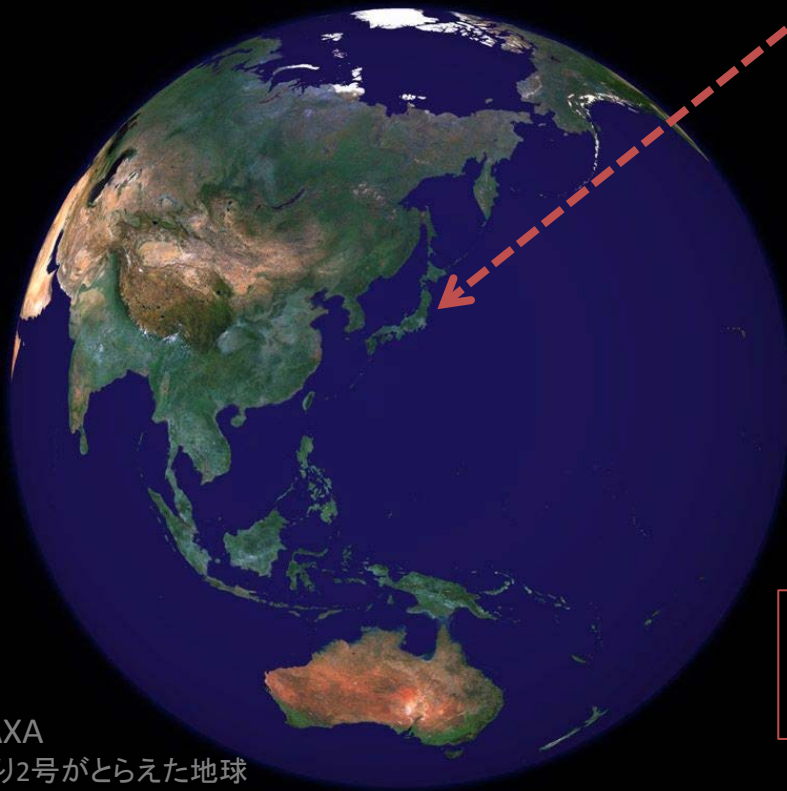
# GPSカーナビの仕組み

- アインシュタインの光速不変の原理(1905): 距離=(光速) $\times$ (時間)
- 光速は定義値: 299792458 m / s (~30万km/s)



# GPS原子時計の相対論的補正

円軌道速度・約4 km/s  
特殊相対論効果で時間の進み  
方が遅れる:  $-8.4 \times 10^{-11}$



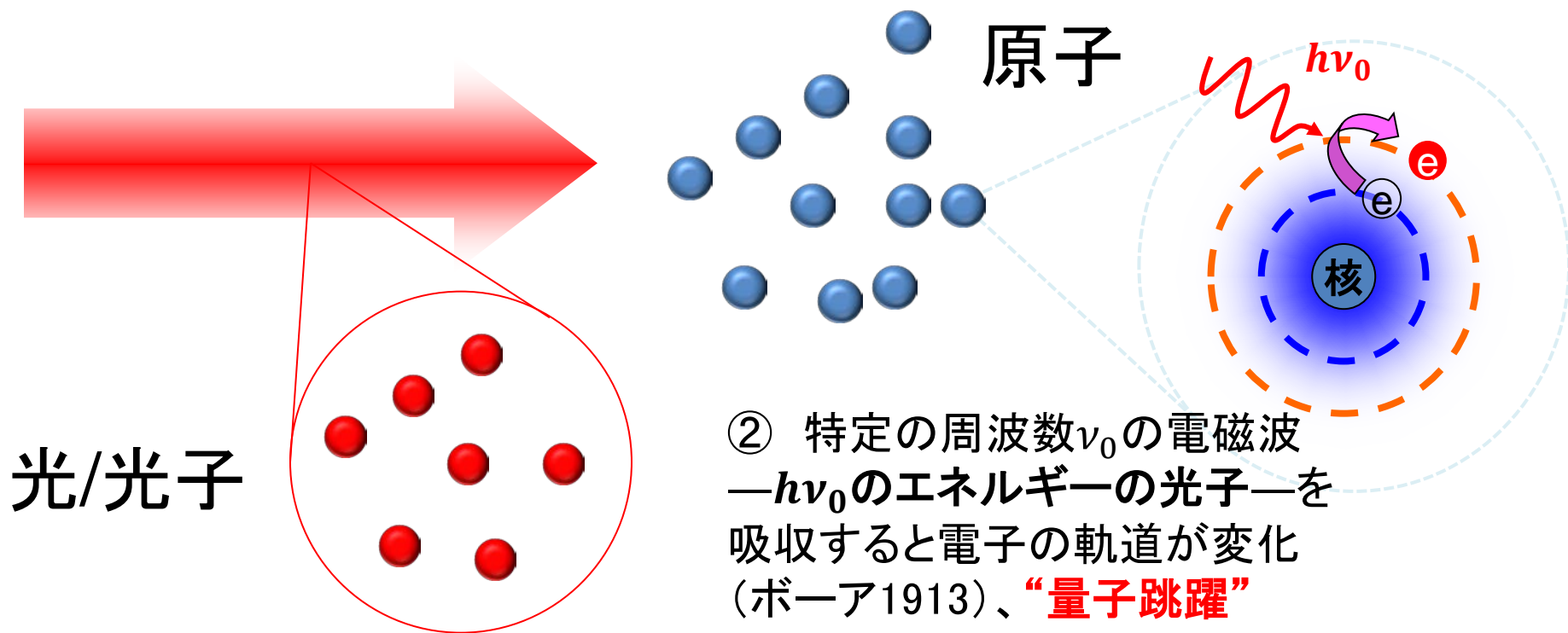
高度・約2万 km、地球の重力場の影響が小さい。一般相対論的効果で、地上よりも時間の進み方が速くなる:  $+5.27 \times 10^{-10}$

特殊相対論と一般相対論で逆の寄与。  
合計で  $+4.43 \times 10^{-10}$  の相対論的補正

1. 原子時計のしかけ
2. 時間を測ることは時間がかかる  
量子のコイン投げ、辿りつけない時間がある
3. 光格子時計の仕組み
4. 光格子時計が見る時空間の歪み

## 原子時計を作る

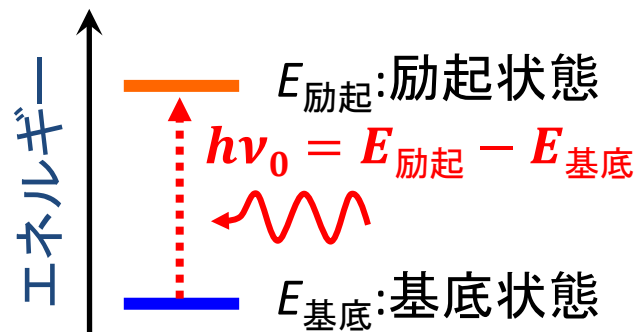
# 量子の世界へ：光と原子、波動性・粒子性、原子時計



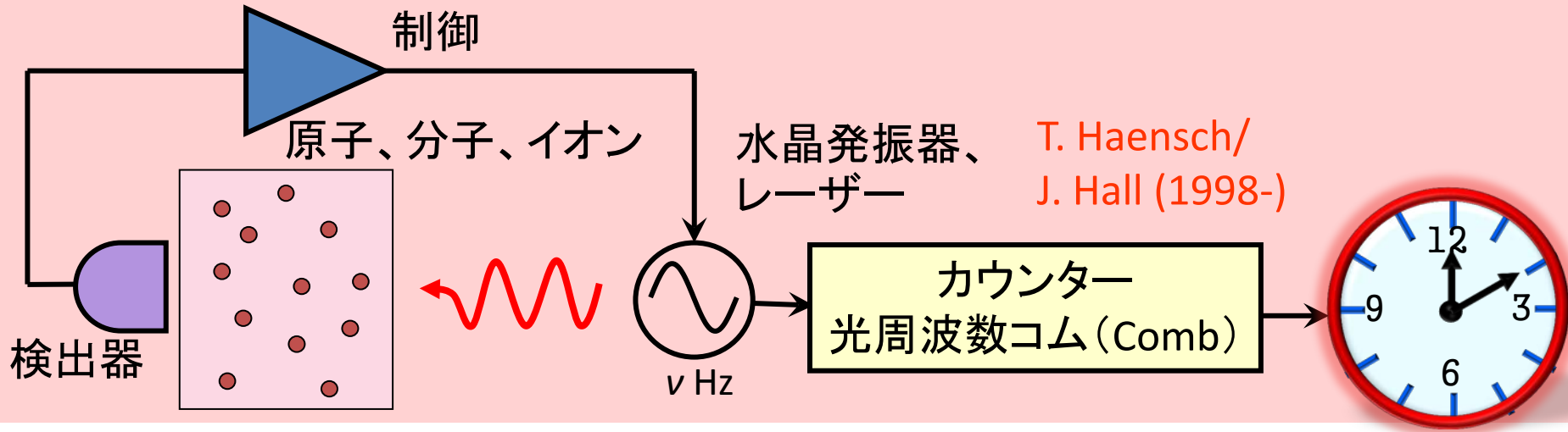
② 特定の周波数 $\nu_0$ の電磁波— $h\nu_0$ のエネルギーの光子—を吸収すると電子の軌道が変化(ボーア1913)、“量子跳躍”

① 光は周波数 $\nu$ をもつ波であると同時にエネルギー $E = h\nu$ と運動量 $p = h/\lambda$ をもつ粒子(光子)である。 $h$ はプランク定数(プランク1900)

③ 原子時計ではこの遷移周波数 $\nu_0$ を正確に測定、周波数の基準とする



# 時計 = 発振器 ( $\nu = 1/T$ ) + カウンター



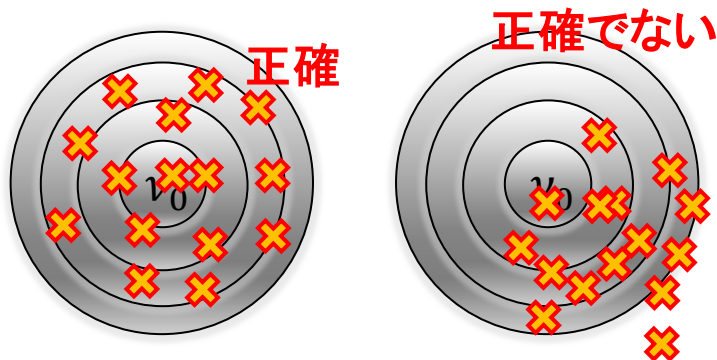
- いい時計を作ることは、いい発振器を作ることと等価
- (物質の固有振動を使う) マクロな発振器は周波数が揺らぐ
- 普遍的な1秒を作りたい: 基礎物理定数は定数と信じれば...
- 「量子の振動子」=「原子」の振動を読み出してマクロな発振器にコピーする→原子時計
- 研究の大前提は本当か？

# 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 $\delta\nu \approx 10^{-3} - 10^{-5}$  Hzが同程度なら、周波数 $\nu_0$ 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

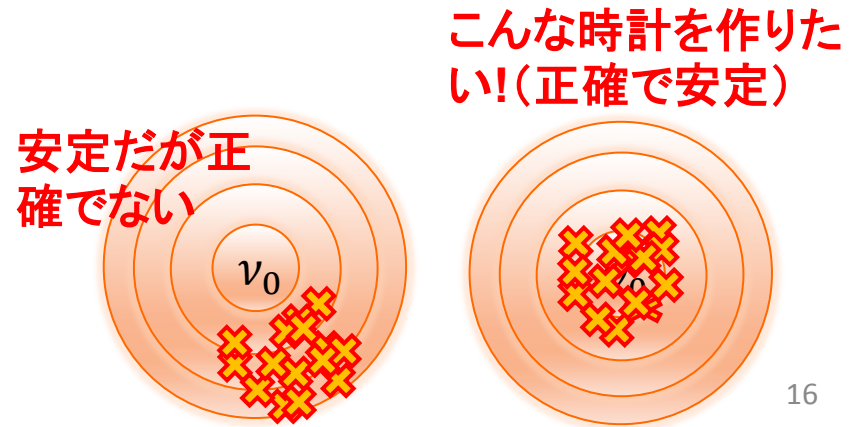
## 正確さ (Accuracy)

- 原子固有の遷移周波数からのずれの小ささ(ドップラー効果、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



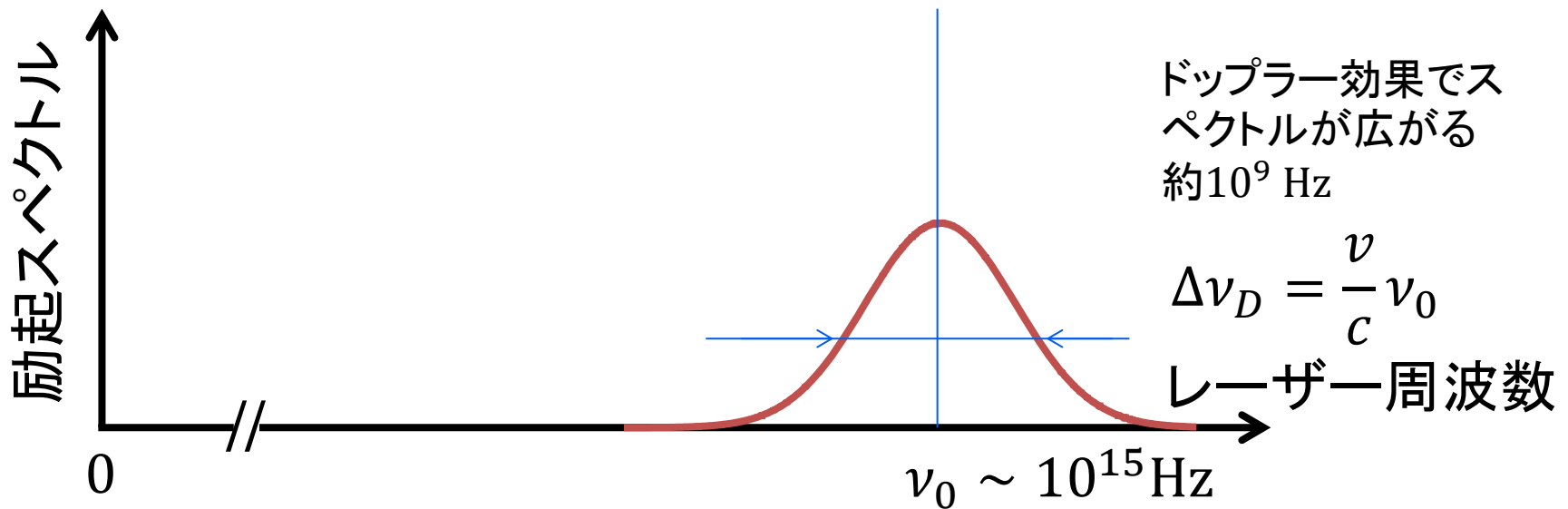
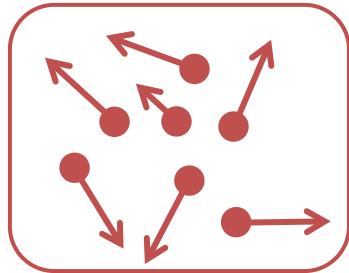
## 安定度 (Stability)

- どれだけ早く、中心値を狙えるか？
- 量子雑音が制限

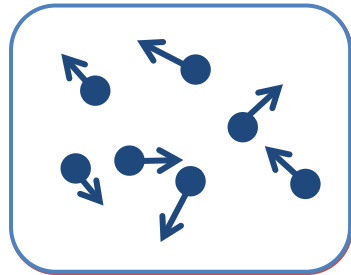


# 原子のスペクトル

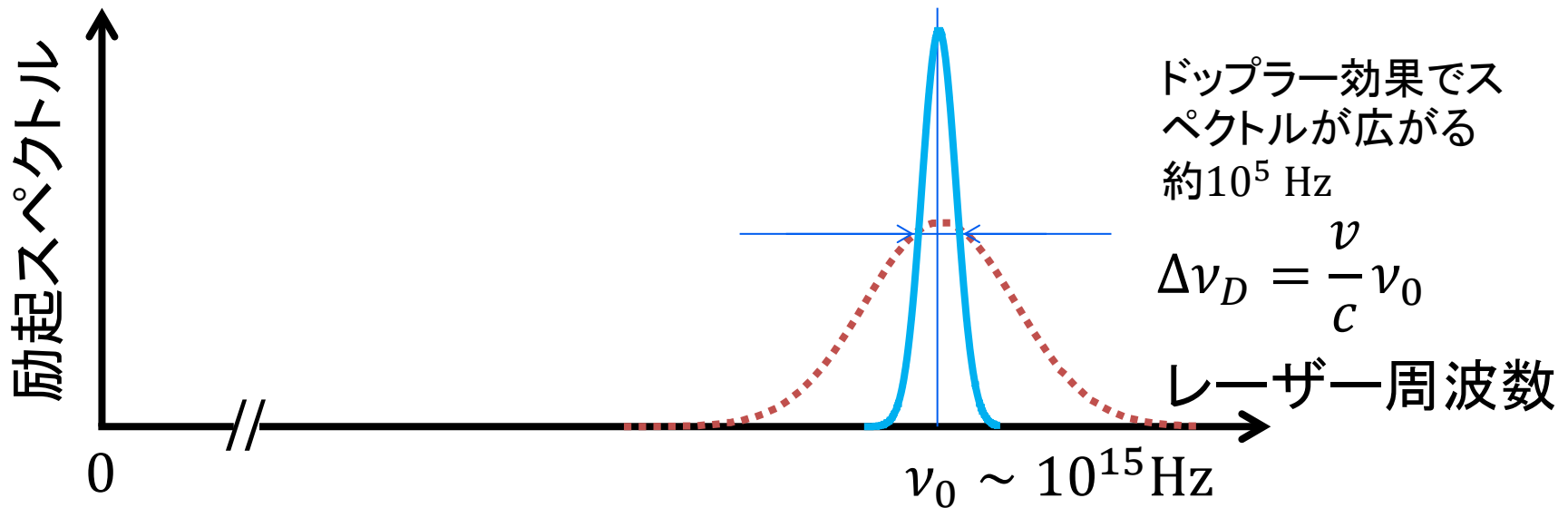
原子が室温(300K)のとき



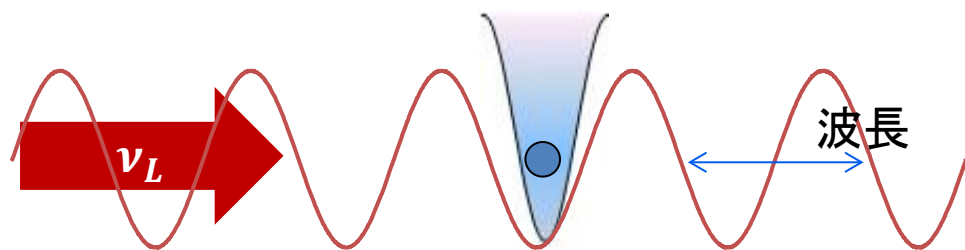
# 原子のスペクトル



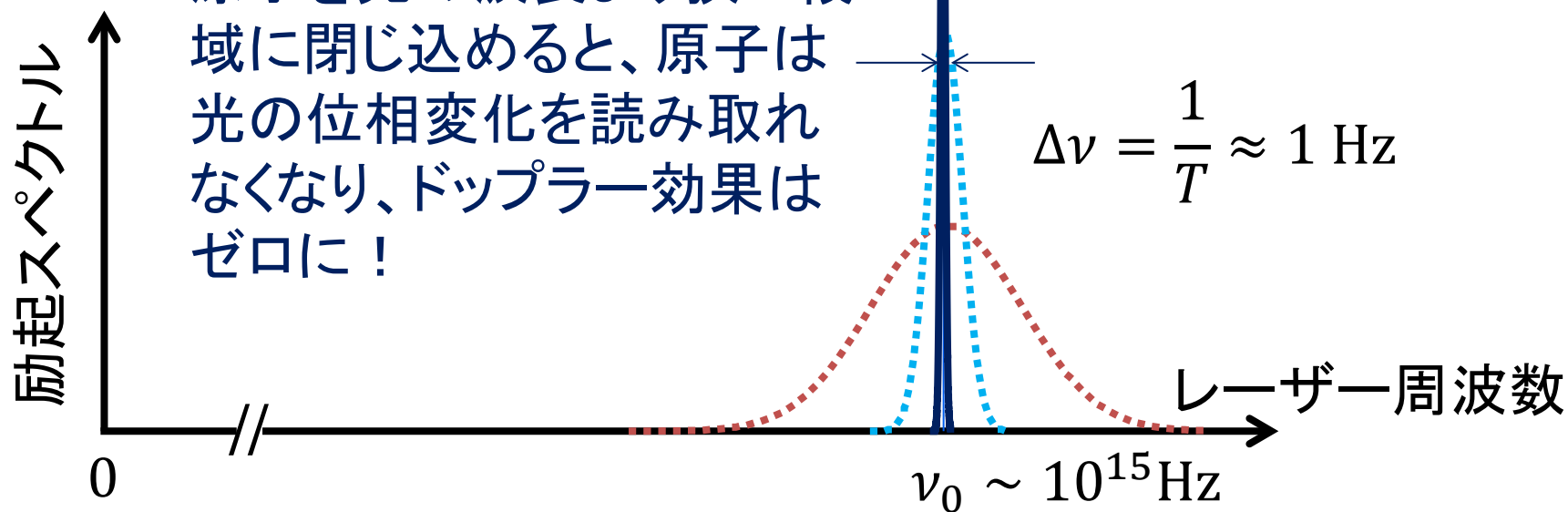
原子を冷却( $10^{-5}\text{K}$ )すると  
ドップラー効果が小さくなる



# 原子のスペクトル



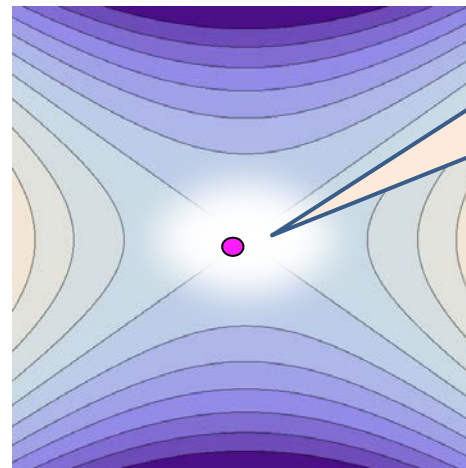
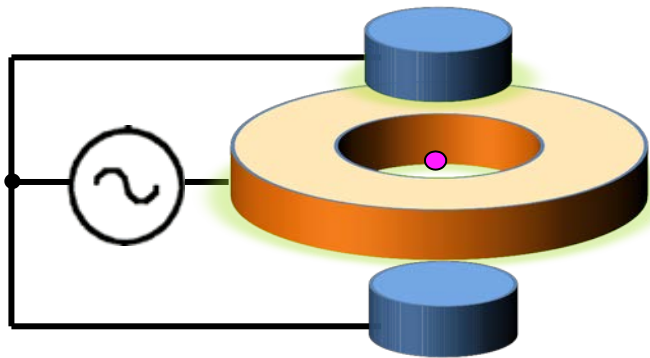
原子を光の波長より狭い領域に閉じ込めると、原子は光の位相変化を読み取れなくなり、ドップラー効果はゼロに！



- スペクトル幅は原子と光の相互作用時間で決まる
- 不確定性原理から、 $T \times \Delta\nu \approx 1$

# 単一イオンを電場のゼロ点に閉じ込める ポールトラップ

- 1950年代W. ポールが考案
- 1980年代H. デーメルトはポールトラップ中の単一イオンを使う原子時計を提案。単一イオンの観測実験を実証。
- 1989年、ポール、デーメルト、(ラムゼー)にノーベル物理学賞
- 次世代原子時計の決定版に思われた。



電子棚上げ法: 電子状態が100%の効率で測定

—●—  $|e\rangle$

—●—  $|g\rangle$

四重極の振動電場で、荷電粒子を

- トラップ電場のゼロ点近傍
- 光の波長より十分小さい領域に捕まえる。

著作権の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました。

1989年ノーベル物理学賞

Norman F. Ramsey  
「分離振動場法の開発、およびその水素メー  
ザーや原子時計への応用」

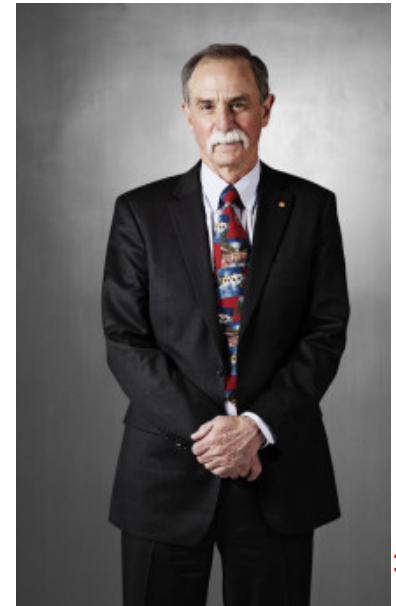
Hans G. Dehmelt  
Wolfgang Paul  
「イオン・トラップ法の開発」

2012年ノーベル物理学賞

Serge Haroche



David J. Wineland



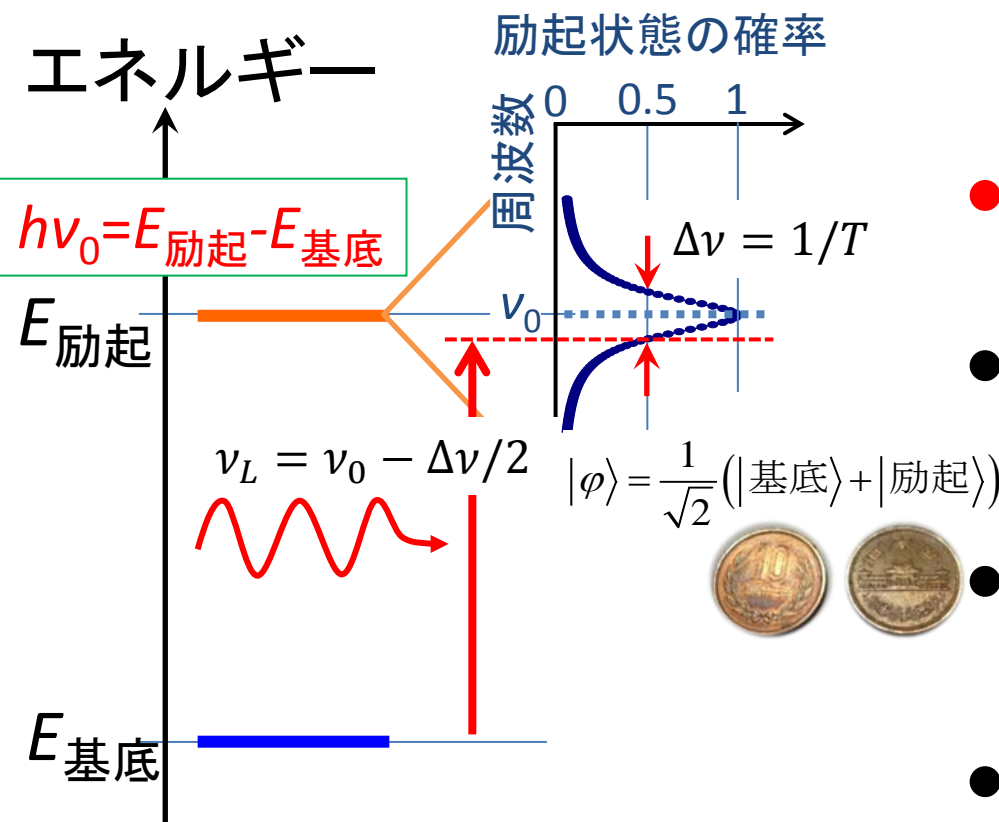
“ground-breaking experimental methods that enable measuring  
and manipulation of individual quantum systems”

© Nobel Foundation 2012 Photo: Ulla Montan

原子の振子の周波数を読む

**量子のコイン投げ、裏か表か**

# 原子励起確率からレーザーの周波数を読み出す —量子揺らぎとの戦い—

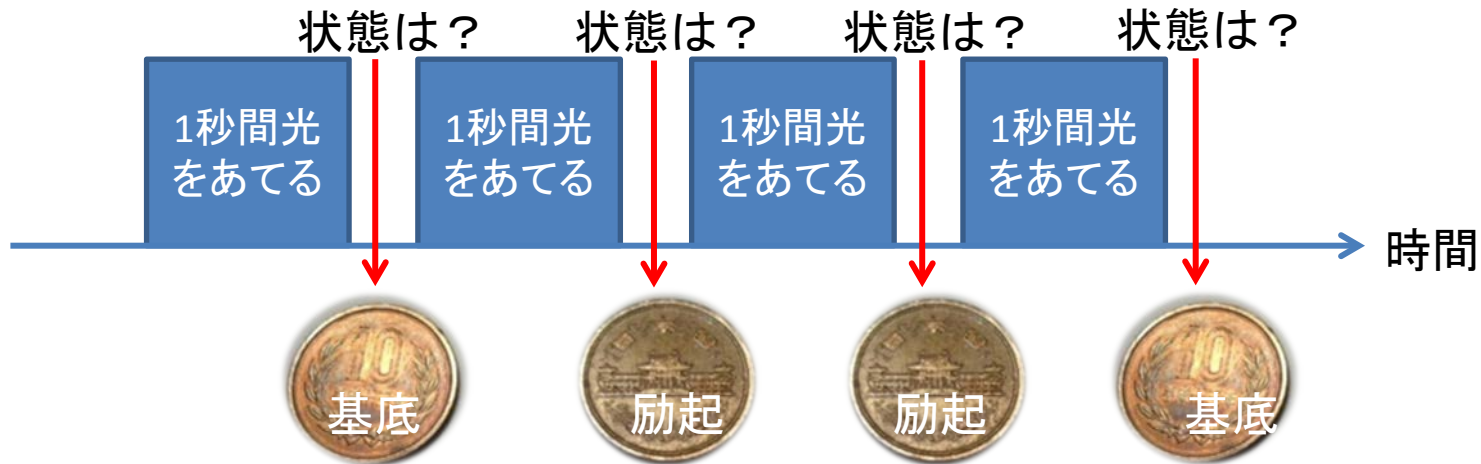


W. M. Itano *et al.*, *Phys. Rev.*  
A 47, 3554 (1993).

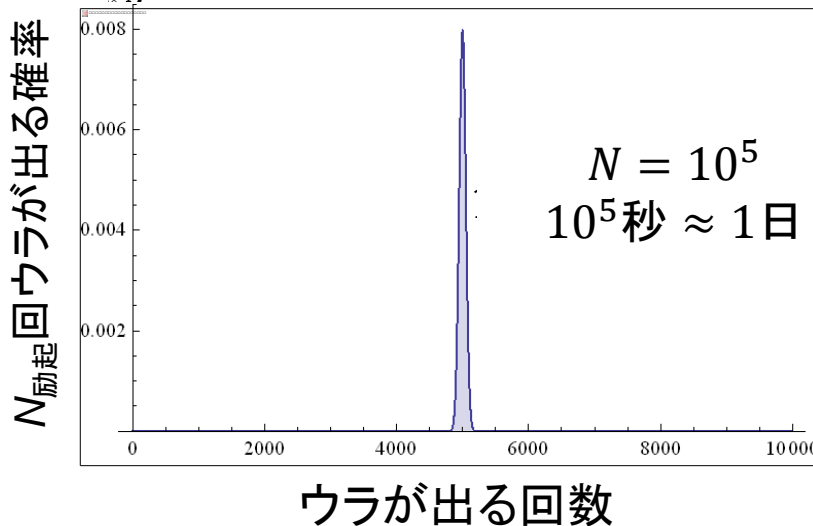
- 原子のスペクトル幅:  $\Delta\nu = \frac{1}{T}$
- レーザー周波数を共鳴から  $\Delta\nu/2$  ずらせば、レーザー周波数を感度よく励起状態を見出す確率に変換できる
- このとき原子の励起確率は  $1/2 \rightarrow$  基底状態、励起状態が半々の重ね合わせ
- 観測した瞬間に基底状態(オモテ)か、励起状態(ウラ)が決まる  $\rightarrow$  得られる信号はオモテ・ウラの2値(量子化される)しかとらない
- オモテならレーザー周波数  $\nu_L$  は  $\nu_0 - \Delta\nu/2$  より低い、ウラなら高い(共鳴に近い)と推定する
- $\nu_L = \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2} \left(1 + \frac{N_{\text{基底}} - N_{\text{励起}}}{N}\right)$

量子性に起因する雑音  $\rightarrow 0$  に近づけたい 23

# コイン投げの統計



確率  $p_{\text{励起}}$  の  $N$  回の (独立な) 試行で、 $N_{\text{励起}}$  回ウラが出る確率 → 二項分布



$p_{\text{励起}} \approx \frac{1}{2}$  のとき、試行回数を増やすほど、オモテ、ウラの出る頻度は等しくなっていく、相対的な揺らぎは、

$$\left\langle \frac{\Delta N_{\text{励起}}}{N} \right\rangle = \frac{\sqrt{N}/2}{N} = \frac{1}{2\sqrt{N}}$$

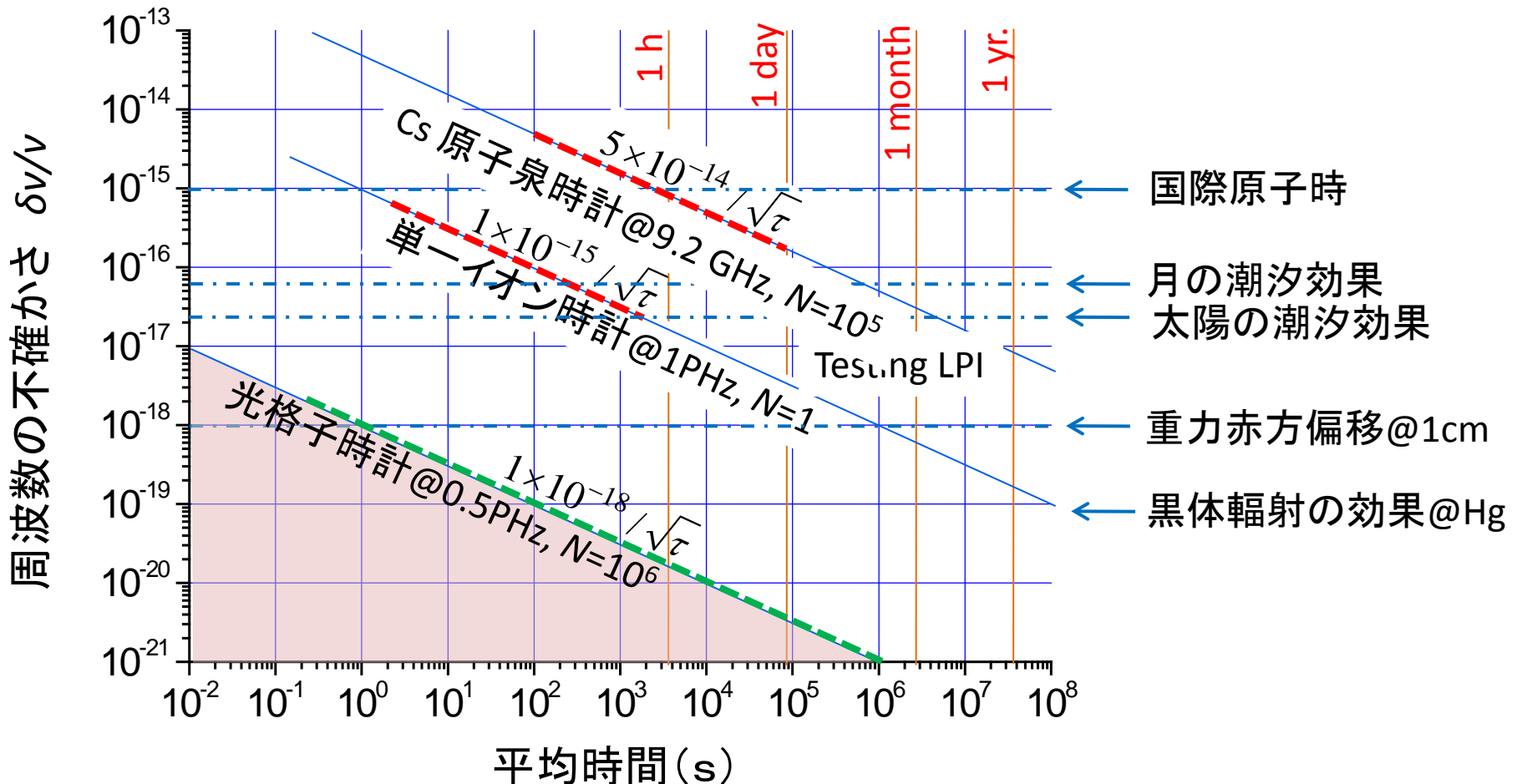
10日かけて、 $N = 10^6$  回測定を繰り返すと、スペクトル幅の  $10^{-3}$  まで周波数を読み取れる

# 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

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

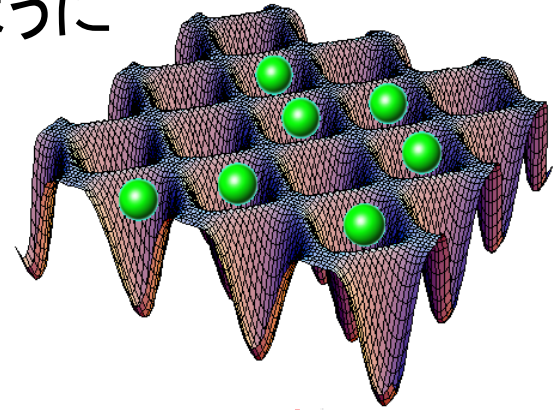
$n$ : 1秒間に観測する原子数  
 $\tau$ : 平均時間



# 発想の転換：摂動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力学的限界に到達（時間がかかる）
- 原子を100万個捕まえる容器を作ろう！
  - 個々の原子運動の精密制御
  - 容器が原子の振子の振動を変えないように
  - “光格子時計”の概念の提案

（Katori 2001・FSM）



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

\* Takamoto *et al.* (2005)  
An optical lattice clock,  
*Nature* 435(7040): 321-  
324, p.321, Fig.1a.

強い電磁場で原子を捕まえても、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！



# 光で原子を並べる:光格子

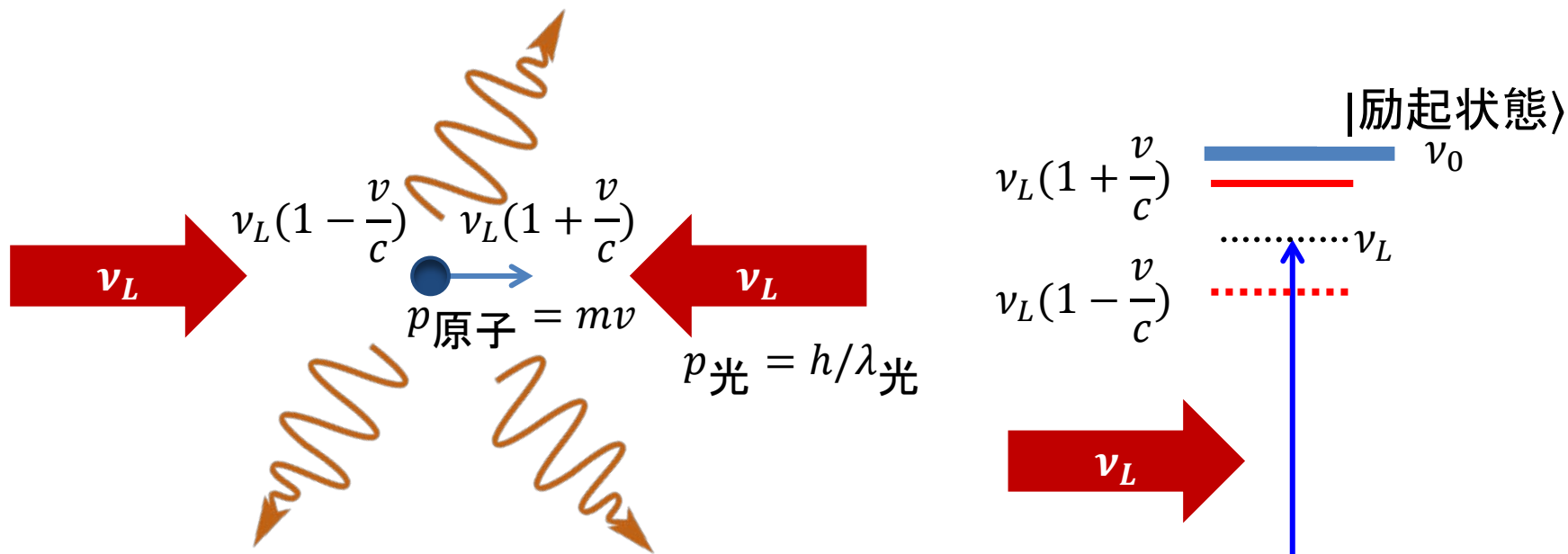
# レーザー光による原子の運動操作

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997年ノーベル賞)

## 1) レーザー冷却:

原子の運動量を光子の運動量で制御する

→ 絶対温度0.000001Kかもっと低温まで原子を冷却



$\nu_L < \nu_0$  のとき, ドップラー効果により,  
対向ビームの光をより多く散乱し原子は減速

$|基底状態\rangle$

# レーザー光による原子の運動操作

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997年ノーベル賞)

## 2) 光双極子トラップ:

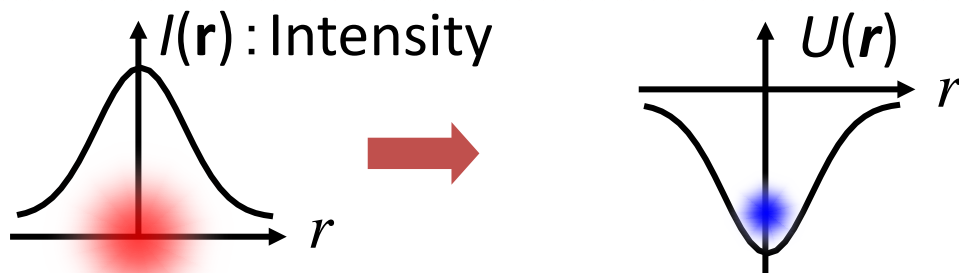
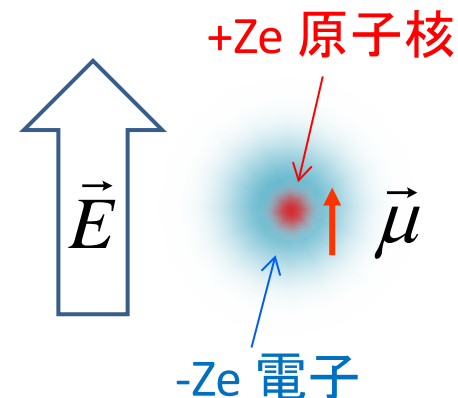
電場を加えると原子は分極する

— 誘起双極子:  $\mu = \alpha(\omega)E(\omega)$

— 誘起双極子と電場が相互作用

→ 光シフト (光周波数に依存):

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



$\alpha$  はレーザー周波数  $\omega$  に依存する。 $\omega < \omega_0$  なら  $\alpha > 0$  となり、原子は光が強いところへ

# レーザー光による原子の運動操作

(Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, 1997年ノーベル賞)

## 2) 光双極子トラップ:

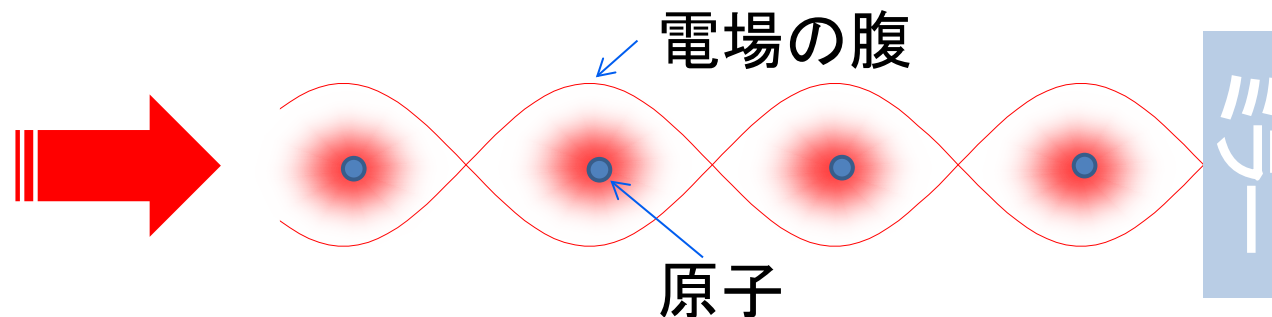
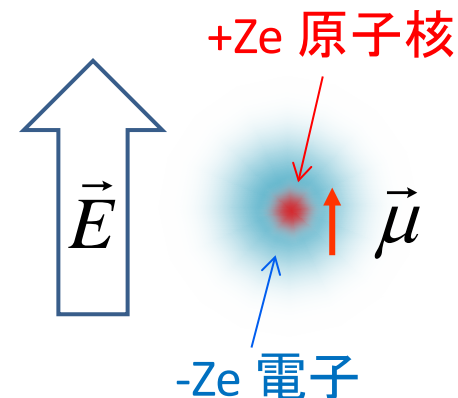
電場を加えると原子は分極する

— 誘起双極子:  $\mu = \alpha(\omega)E(\omega)$

— 誘起双極子と電場が相互作用

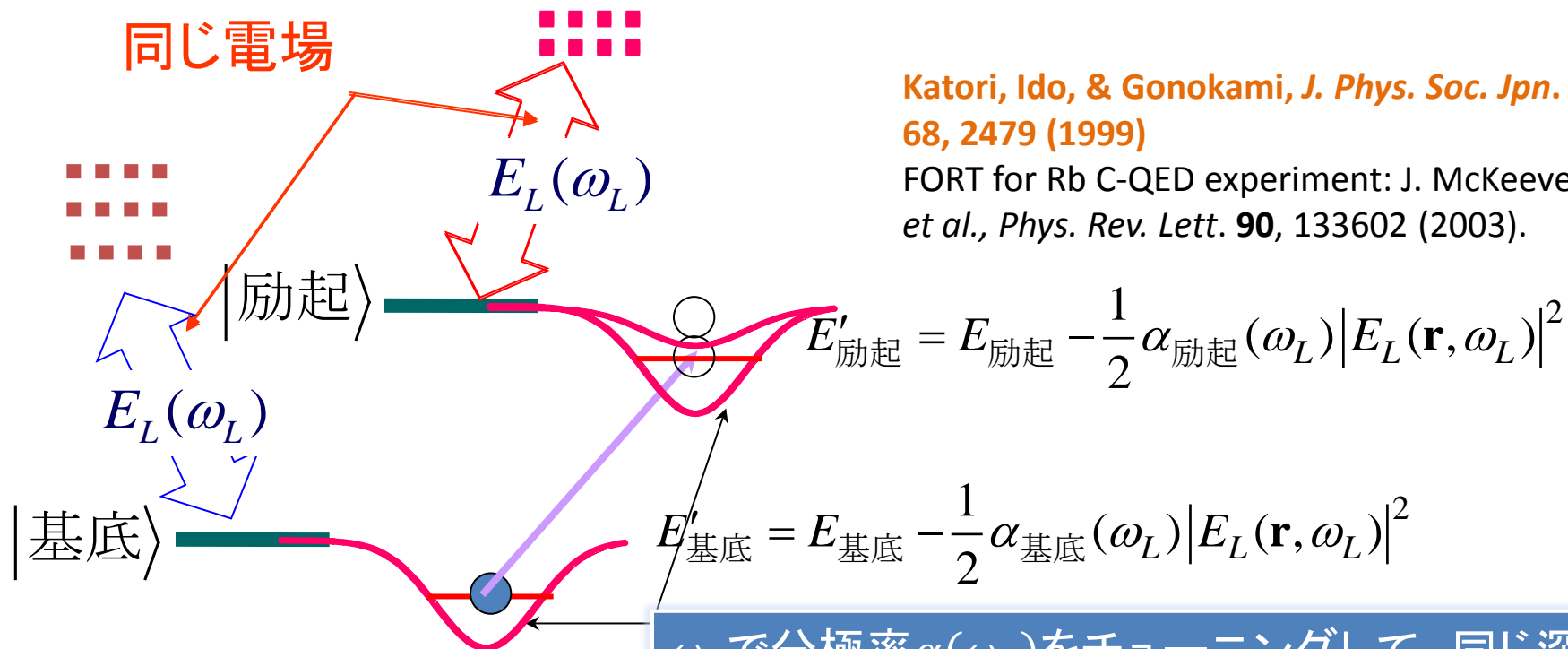
→ 光シフト (光周波数に依存):

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



光の定在波中では、極低温原子は光強度が最大の腹に捕獲される: 原子が光の格子で並ぶ → 「光格子」

# 光双極子トラップで加わる光シフトを取り除く



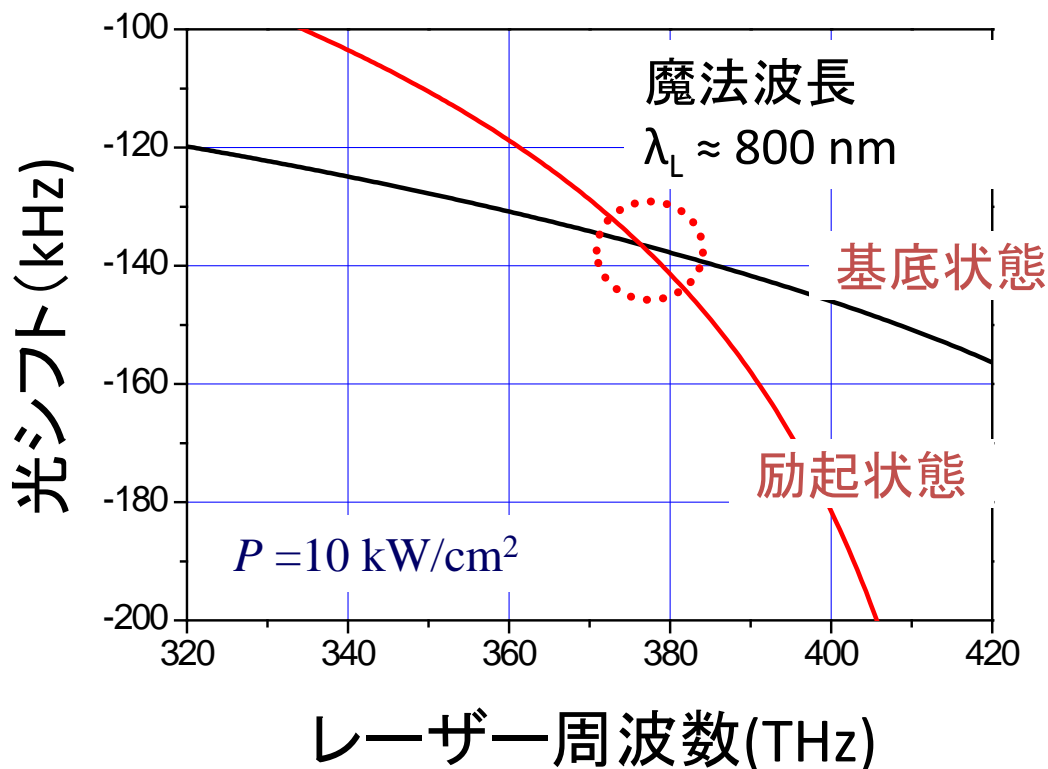
Katori, Ido, & Gonokami, *J. Phys. Soc. Jpn.* **68**, 2479 (1999)

FORT for Rb C-QED experiment: J. McKeever *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 133602 (2003).

$\omega_L$  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

$$h\nu = (E_{\text{励起}} - E_{\text{基底}}) - \frac{\alpha_{\text{励起}}(\omega_L) - \alpha_{\text{基底}}(\omega_L)}{2} |E_L(\omega_L)|^2 + O(E^4)$$

# 光シフトを打ち消す魔法周波数



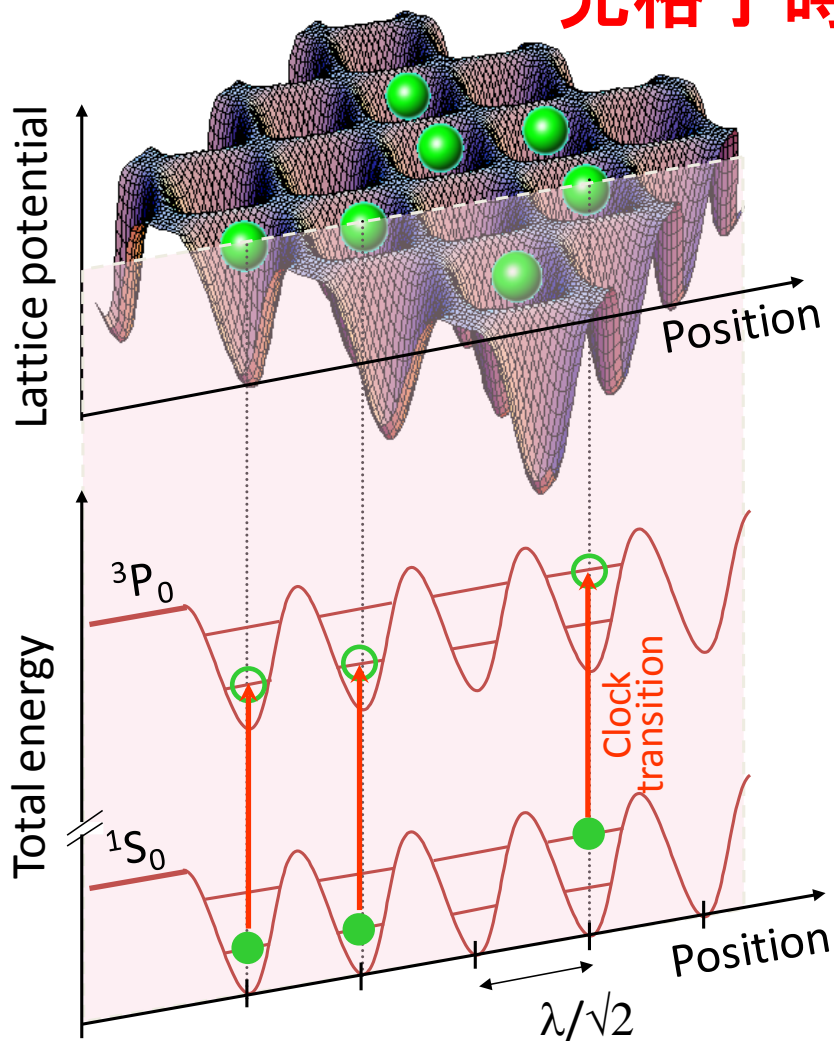
- 周波数だけで、遷移周波数への摂動を制御
- 周波数は9-12桁まで容易に制御可能
- 光シフトの周波数依存性

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

- 魔法周波数を9桁で決め、プロトコルとして共有すると、18桁精度の時計が作れる。

# 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

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

- 魔法周波数を9桁で決め、プロトコルとして共有すると、18桁精度の時計が作れる。

# (1次元)光格子時計の実現(2005) LETTERS

## An optical lattice clock

Masao Takamoto<sup>1</sup>, Feng-Lei Hong<sup>3</sup>, Ryoichi Higashi<sup>1</sup> & Hidetoshi Katori<sup>1,2</sup>

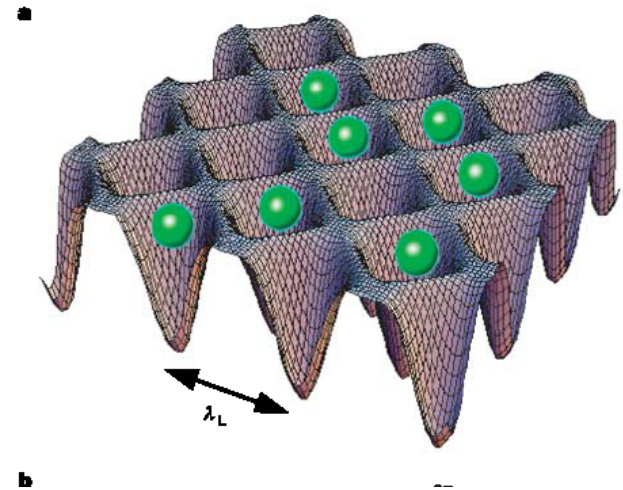
The precision measurement of time and frequency is a prerequisite not only for fundamental science but also for technologies that support broadband communication networks and navigation with global positioning systems (GPS). The SI second is currently realized by the microwave transition of Cs atoms with a fractional uncertainty of  $10^{-15}$  (ref. 1). Thanks to the optical frequency comb technique<sup>2,3</sup>, which established a coherent link between optical and radio frequencies, optical clocks<sup>4</sup> have attracted increasing interest as regards future atomic clocks with superior precision. To date, single trapped ions<sup>4-6</sup> and ultracold neutral atoms in free fall<sup>7,8</sup> have shown record high performance that is approaching that of the best Cs fountain clocks<sup>1</sup>. Here we report a different approach, in which atoms trapped in an optical lattice serve as quantum references. The 'optical lattice clock'<sup>9,10</sup> demonstrates a linewidth one order of magnitude narrower than that observed for neutral-atom optical clocks<sup>7,8,11</sup>, and its stability is better than that of single-ion clocks<sup>4,5</sup>. The transition frequency for the Sr lattice clock is 429,228,004,229,952(15) Hz, as determined by an optical frequency comb referenced to the SI second.

Accurate atomic clocks rely on the observation of a narrow atomic resonance  $\Delta\nu$  at a transition frequency  $\nu_0$  that is insensitive to external perturbations to the highest possible degree. An indicator of clock performance is the fractional instability, which is minimized by repeatedly measuring the high-Q ( $Q = \nu_0/\Delta\nu$ ) transition. The fractional instability is given by the Allan deviation<sup>12</sup>

$$\sigma_y(\tau) \approx \Delta\nu/(\nu_0\sqrt{N\tau}) \quad (1)$$

can confine atoms in a submicrometre region, and its periodicity allows the production of billions of micro-traps in a volume of  $1 \text{ mm}^3$ . These features are indeed attractive for fine spectroscopy with enhanced stability.

In general, such a lattice-trapping field significantly modifies the internal states of atoms by so-called light shifts, and so the system was not seriously considered for atomic clocks until the demonstration of the light shift cancellation technique<sup>16,17</sup>. The transition frequency  $\nu$



\* Takamoto *et al.* (2005) An optical lattice clock, *Nature* 435(7040): 321-324, p.321, Fig.1a.

著作権の都合により、ここに挿入されていた画像を削除しました。

朝日新聞

2012年5月19日

朝刊2面

「超高精度の時計、  
基礎実験に成功

東大・産総研グループ  
137億年前の宇宙誕生  
から誤差0.4秒」



世界中での光時計の実現

# 秒の再定義の機運



Demis、Wikimedia Commons より転載 (2013/2/22)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:WorldMap-B\\_non-Frame.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:WorldMap-B_non-Frame.png)

# 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)

NPL(Sr) SYRTE(Sr,Hg)

PTB(Sr)

HHU(Yb)

LENS(Sr)

INRIM(Yb)

NIM(Sr)

ECNU(Yb)

KRISS(Yb)

NICT(Sr)

AIST(Yb)

Tokyo(Sr,Yb,Hg)

NIST(<sup>171</sup>Yb)

SI limited measurement done 2009

JILA(Sr)

The most recent measurements on Sr:

X. Baillard et al., Eur. Phys. J. D 48, 11 (2008)

G. K. Campbell et al., Metrologia 45, 539 (2008)

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. 5, 022 (2012)

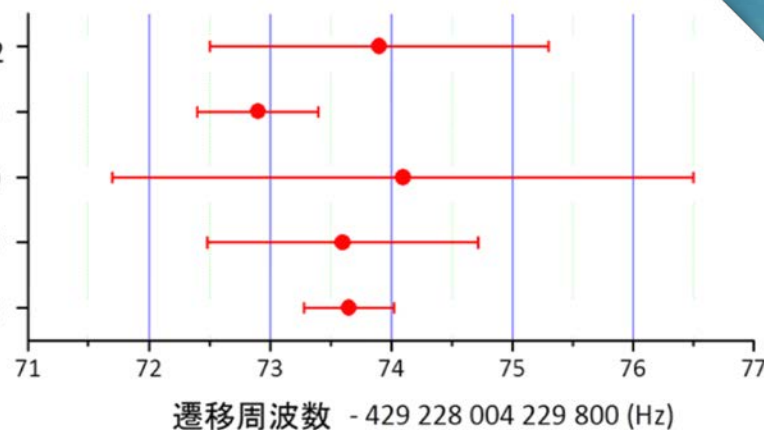
NICT(日本)2012

PTB(ドイツ)2010

東大/NMIJ(日本)2009

SYRTE(フランス)2008

JILA(アメリカ)2008



## 国際度量衡委員会 (2012.10) 勧告値

$$f_{87Sr} = 429\,228\,004\,229\,873.4 \text{ Hz}$$

相対的不確かさ  $1 \times 10^{-15}$  → 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倍正確に時をささむ究極の時計が開発中だ。この精度なら、一般相対論が予測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秒をささみつづける。

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、わずかだがずれてしまうのだ。

東京大学大学院工学系研究科の吉取秀俊教授は、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と、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

吉取秀俊 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がずれていたら励起できない。

## 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（右上にイフスト）。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)

右下に見えるオープンで固体のストロンチウムを加熱して気体にする(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)、その振動数が原子を励起する振動数になっているかを光検出器で確認する。わずかにずれていれば、時計レーザーの振動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振動の回数も、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振動数を正確に計測する。時計の歯車の役割。

## 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。

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地磁気などの影響を受けないようにする。

## 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、固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ほぼ静止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K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。

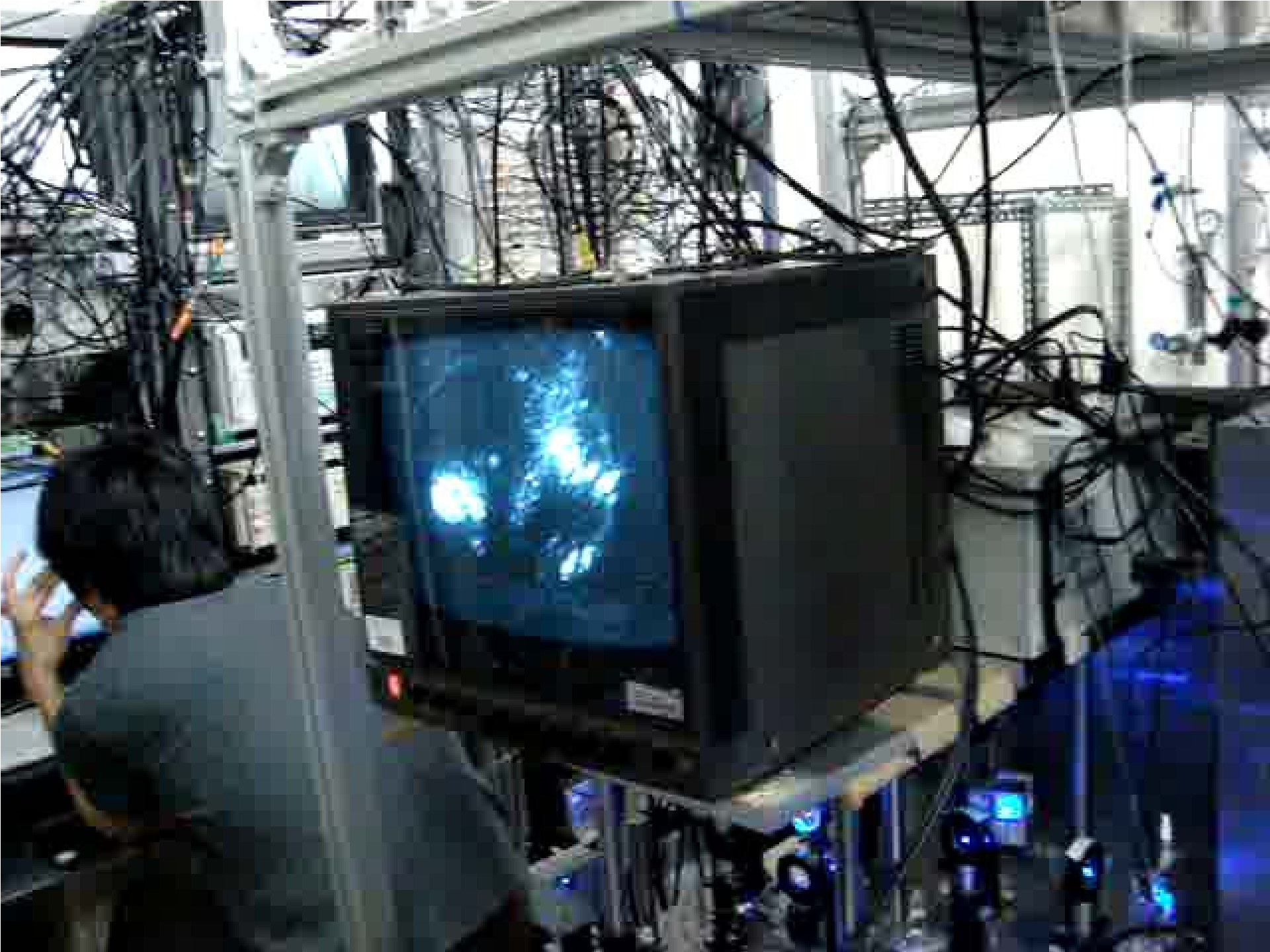
光格子  
卵パックのような形をしている。実際にこのように見えるのではなく、格子状のこの場合は、エネルギーの高低をあらわしている。数万個のストロンチウム原子が、エネルギーの低い、へこんだ部分に捕獲される。

ストロンチウム原子

励起された原子  
適切な振動数の時計レーザーが高エネルギーになると、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、色かえて表現している。

時計レーザー

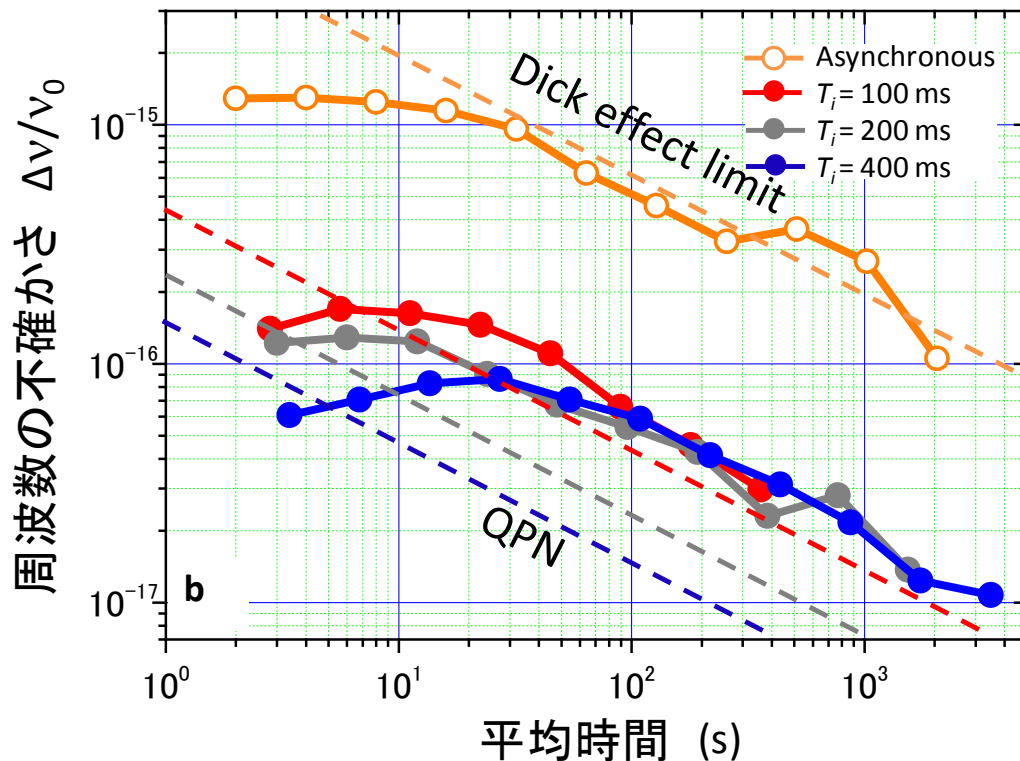
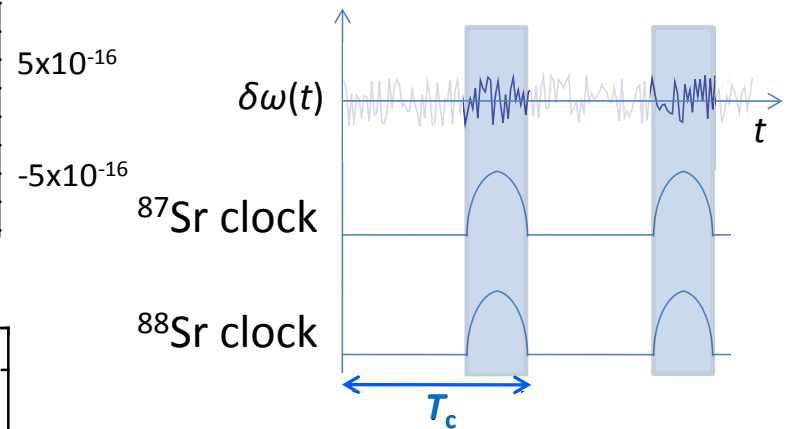
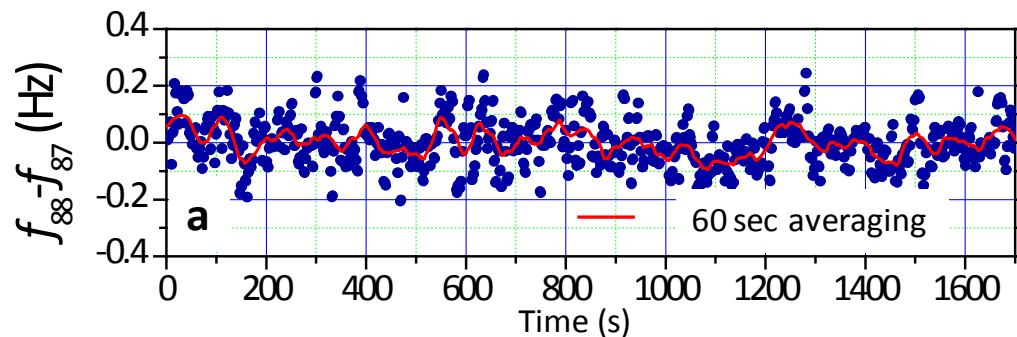
ニクロム線





# 2台の光格子時計 ( $^{87}\text{Sr}$ - $^{88}\text{Sr}$ ) の同期比較

—光格子時計は光格子時計でないとは評価できない—



光時計で  $N \approx 1,000$  原子の量子限界を初めて達成。

← 月や太陽の潮汐効果

← 0.3Kの黒体輻射シフト

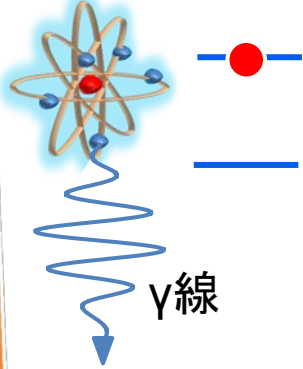
← 10 cm の高度差の重力シフト

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

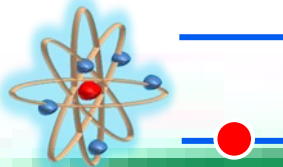
ハーバード・タワー  
実験(1960年)

$^{57}\text{Fe}$



高さ:  $h = 22\text{m}$

$^{57}\text{Fe}$



$M$ : 原子核の基底状態の質量  
 $E_0 = \hbar\omega_0$ : 励起エネルギー

励起した原子核の質量:  $M + E_0/c^2$

励起した原子核を高さ $h$ だけ持ち上げると、地面の基底状態原子に比べて

$E_0 + (E_0/c^2)gh + Mgh$ だけエネルギーが大きい

光子のエネルギー:  $E = \hbar\omega$

放出される光子の振動数は:  $\omega = \omega_0(1 + \frac{gh}{c^2})$

◎エネルギー保存則からの要請

- ✓ 上の時計は青く見える(周波数が高い)
- ✓ 下の時計は赤く見える(重力赤方偏移)
- ✓ 上の方では時間のスケールが早い(下では遅い)
- ✓ 重力ポテンシャルが異なれば、時間の流れが異なるから、世界の各部分での時間の流れは等しくない

アインシュタイン、質量とエネルギーの等価性:  $E = mc^2$

# 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  $2 \times 10^{-15}$  を検証
- **単一イオン時計(2010年):  $\Delta h=30\text{ cm}$  で  $3 \times 10^{-17}$  を検証(1日積算)**

著作権の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました。

Chou et al. (2010)  
Optical Clocks and Relativity,  
*Science* 329(5999): 1630-1633, p.1632, Fig.3.

<http://www.sciencemag.org/content/329/5999/1630>

# 重力が強いと時間はゆっくり進む

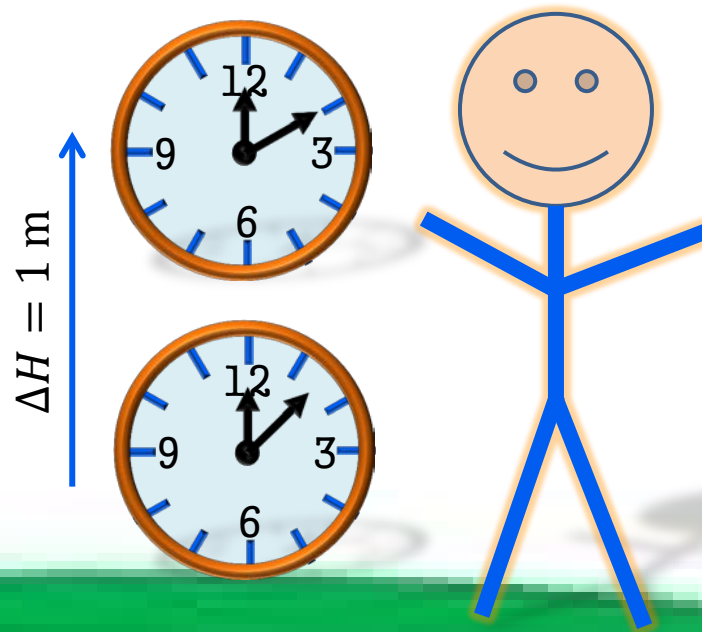
アインシュタインの一般性相対論の予言

- ハーバードタワー実験(1960年):  $\Delta h=22.6\text{m}$  で  $2 \times 10^{-15}$  を検証
- 単一イオン時計(2010年):  $\Delta h=30\text{cm}$  で  $3 \times 10^{-17}$  を検証(1日積算)
- 光格子時計(2011年):  $1 \times 10^{-17}$  (30分積算)  $\rightarrow \Delta h=10\text{cm}$  が見える
- 201x年:  $1 \times 10^{-18}$  (数10秒積算) の時計で  $\Delta h=1\text{cm}$  を見たい  
 $\rightarrow$  時間の相対論的効果をセンシングのツールへ!

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{g\Delta H}{c^2} \approx 1.1 \times 10^{-16}$$

だけ時間が早く進む

パーソナルスケールで相対論的  
効果が現れる



**時計をつなぐと新しい物理が見えてくる**

# —時計と重力

- ジオイドの探索
- 原子の時間は普遍なのか？

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？

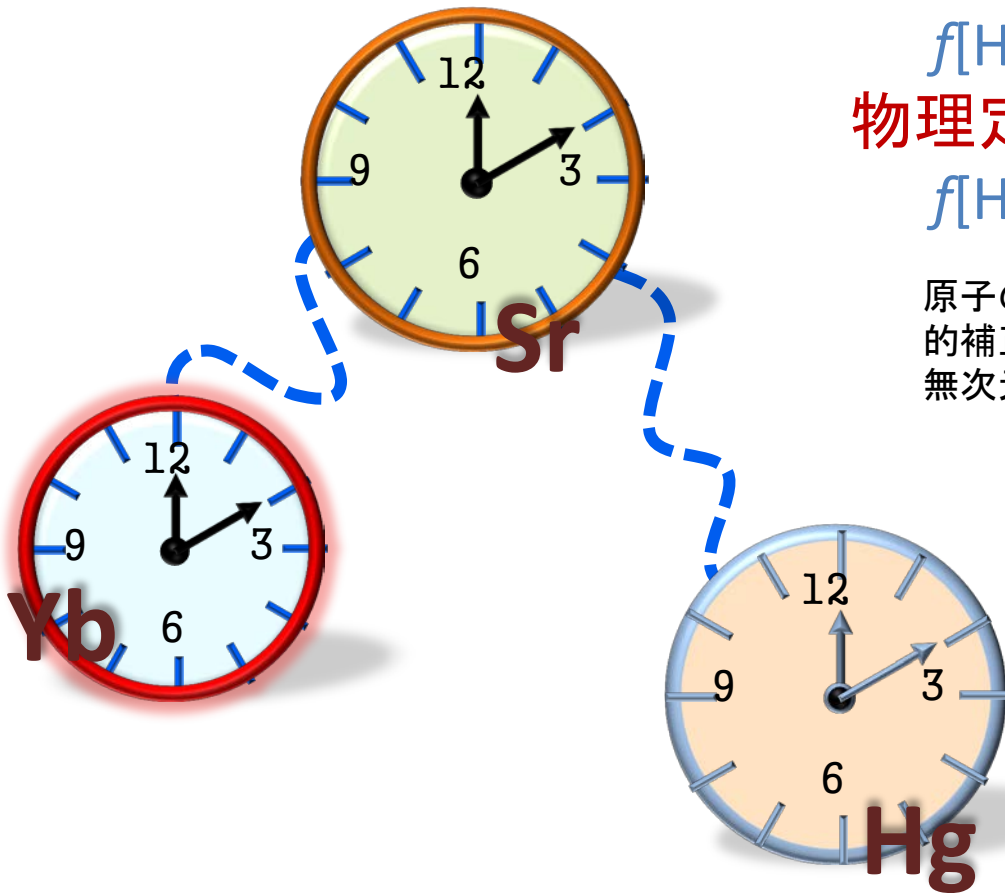
$$f[\text{Hg}(\alpha(U_g))]/f[\text{Sr}(\alpha(U_g))]$$

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

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

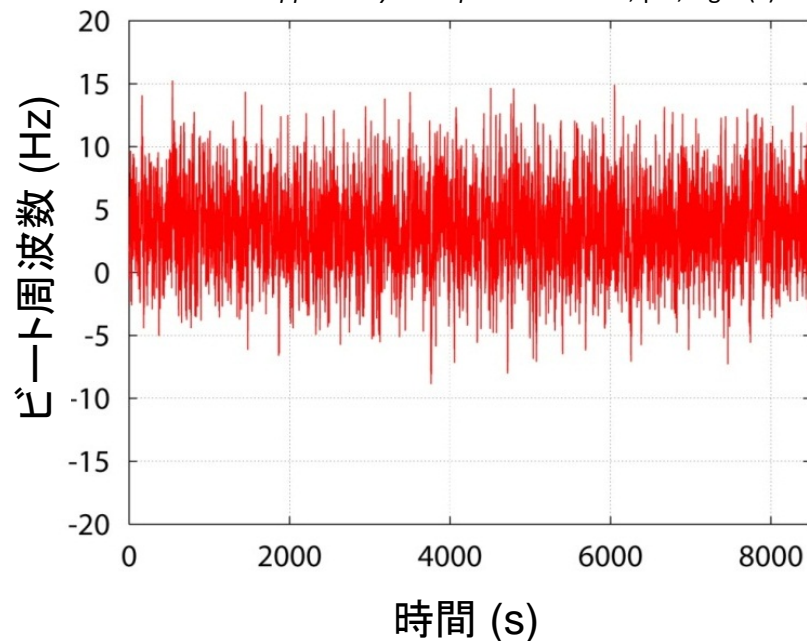
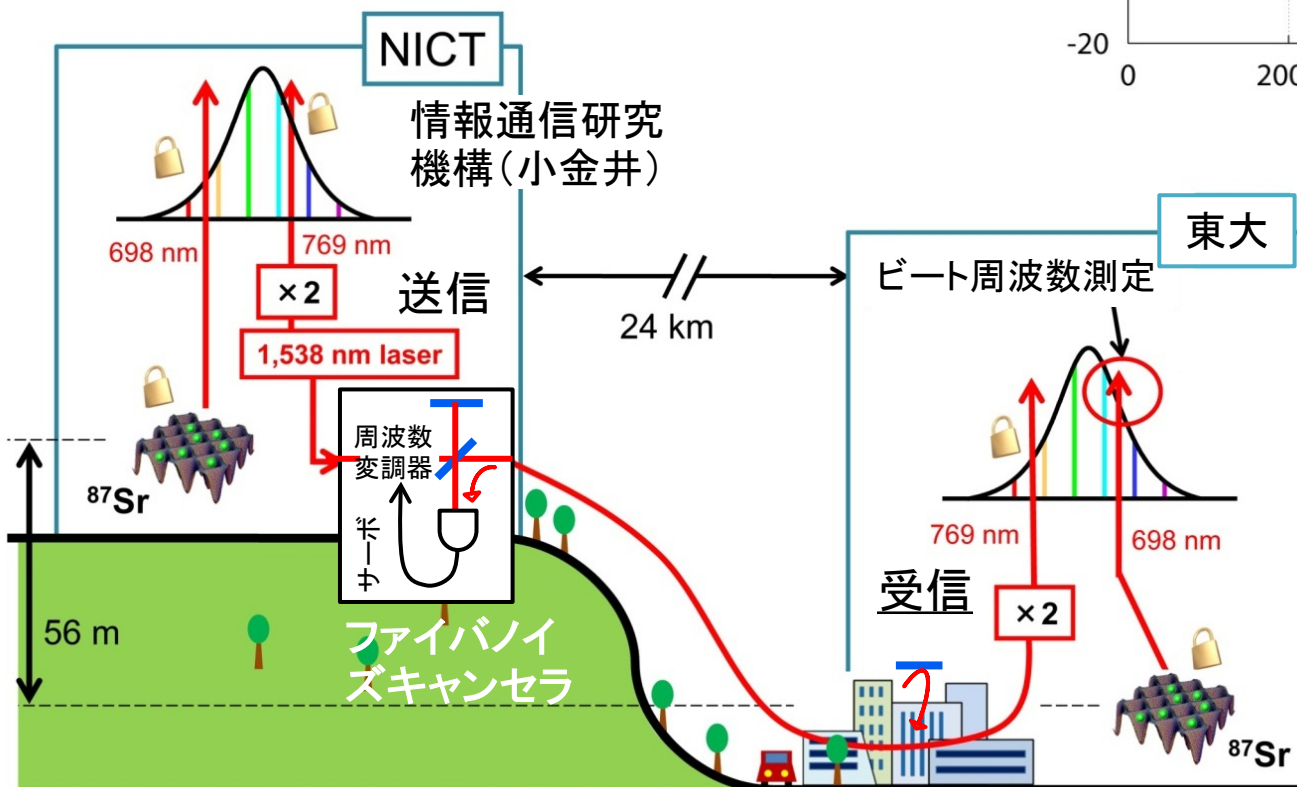
光速 (相対論的定数)  
プランク定数 (量子論的定数)



# 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 *et al.* (2011) Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the  $10^{-16}$  Uncertainty, *Applied Physics Express* 4: 082203, p.2, Fig. 2(a).

\* Yamaguchi, A., Fujieda, M., Kumagai, M., Hachisu, H., Nagano, S., Li, Y., Ido, T., Takano, T., Takamoto, M., & Katori, H. (2011) Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the  $10^{-16}$  Uncertainty, *Applied Physics Express* 4: 082203, p.2, Fig. 1.

# 東京圏で光格子時計のネットワークを作る



本郷・和光の重力ポテンシャル差を1cmの精度で読み出して、常時観測したい。どんな情報が見えるだろうか？首都圏の実時間・重力ポテンシャルマッピングも可能になるだろう。

## 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

- 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桁の時間計測

- 光格子時計は「魔法波長」のプロトコルを導入して、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。相対論的時空間がパーソナルスケールに！—物理定数は定数なのか？
- サルバドールダリの「記憶の固執」に登場する「やわらかい時計」
- 相対論的な時空間の工学的応用へ
- 科学・技術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？