

戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) 第4回成果発表会

開催日: 平成20年6月11日(水)

開催場所: 大手町サンケイプラザ(東京都千代田区大手町1-7-2)

光格子時計の高精度化に関する研究

東京大学大学院工学系研究科 物理工学専攻

香取 秀俊

— 2003年提案書要旨から抜粋 —

時計遷移のシュタルクシフトをキャンセルする光格子...
ドップラー・フリー分光を行う。...この新たな光標準の
手法—光格子時計—を実現し、現在の時間標準であるセシウム原子時計や、次世代の光標準として期待されている水銀イオン...光標準に比べ、本手法が圧倒的な優位性をもつ時間標準となりうることを明らかにする。

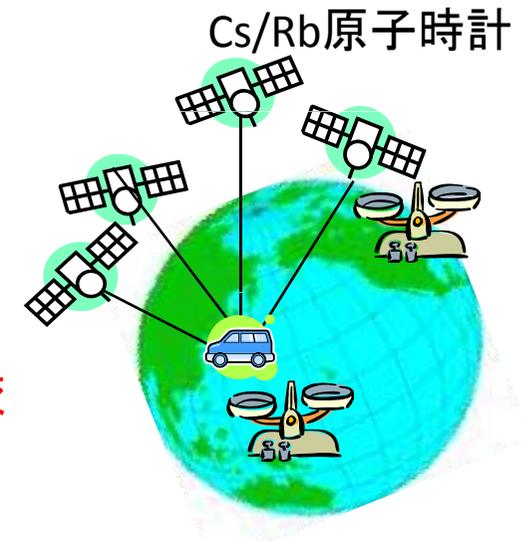
このため、研究終了までにストロンチウム原子の時計遷移を10 Hz程度の線幅で測定し、... 10^{-16} の正確さを達成することを目標とする。

時計研究の意義

- 太古: **天文学**者が天体の運行を観測
 - 大航海時代へ導く
- 現代: **物理学、最も精密な極限計測**
 - GPSによる測位・電波時計・ネットワークの同期, 電波天文学・VLBI
 - 精密分光: 量子力学の建設、相対論検証、物理定数の恒常性...

⇒ **現代科学・工学の根幹**

- 時間計測のものさし
 - 科学の測定: 基準値との比較、SI単位系
 - 長さ、電圧計測も時間・周波数計測に還元
 - “1秒の定義”はSI単位系の要
 - Cs原子時計(1967-)で15桁強の時間計測・国際比較
 - 光周波数コム: 光周波数のカウンター
 - 新たな周波数計測ツール(2005年ノーベル賞)

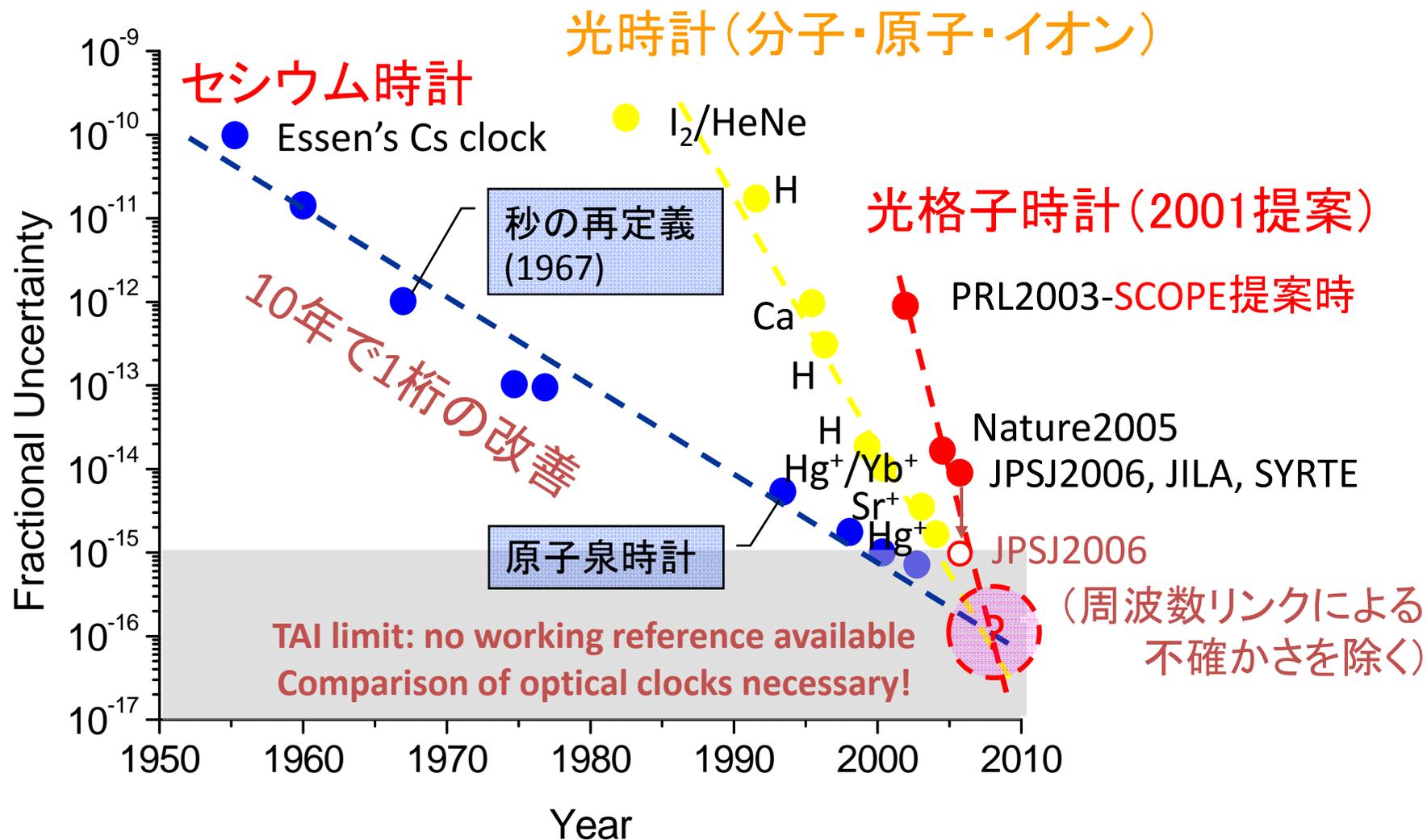


⇒ 19桁の時間比較を実現(L. Ma et al., 2004)

◎これに見合う精度の時間標準の必要性

原子時計の精度向上の変遷

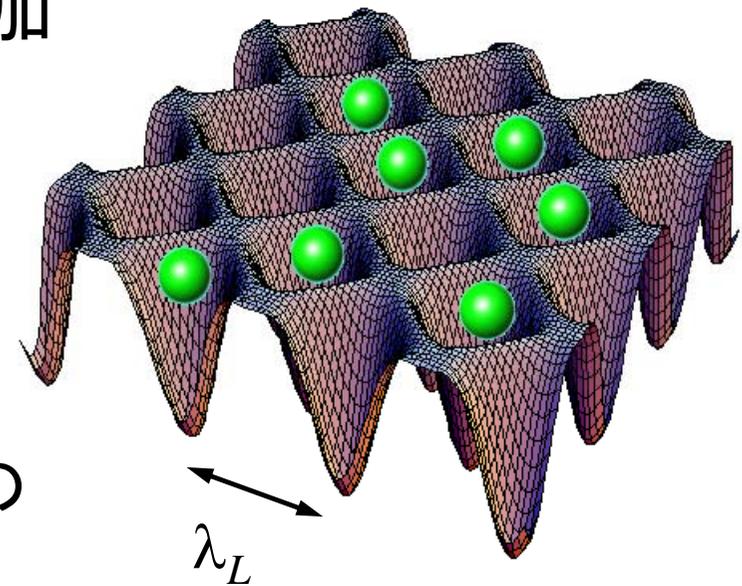
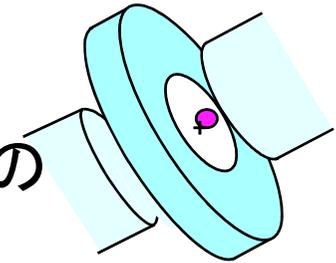
18桁の周波数リファレンスを求めて



(Ref: P. Gill, Optical clocks, Physics World, May 2005)

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(Paul, Dehmelt 1989ノーベル賞)の量子力学的限界に到達
- エンジニアリングした摂動の印加
 - 個々の原子運動の精密制御
 - 摂動の影響を18桁制御可能か？
 - “光格子時計”の概念の提案
(Katori 2001・FMS)



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

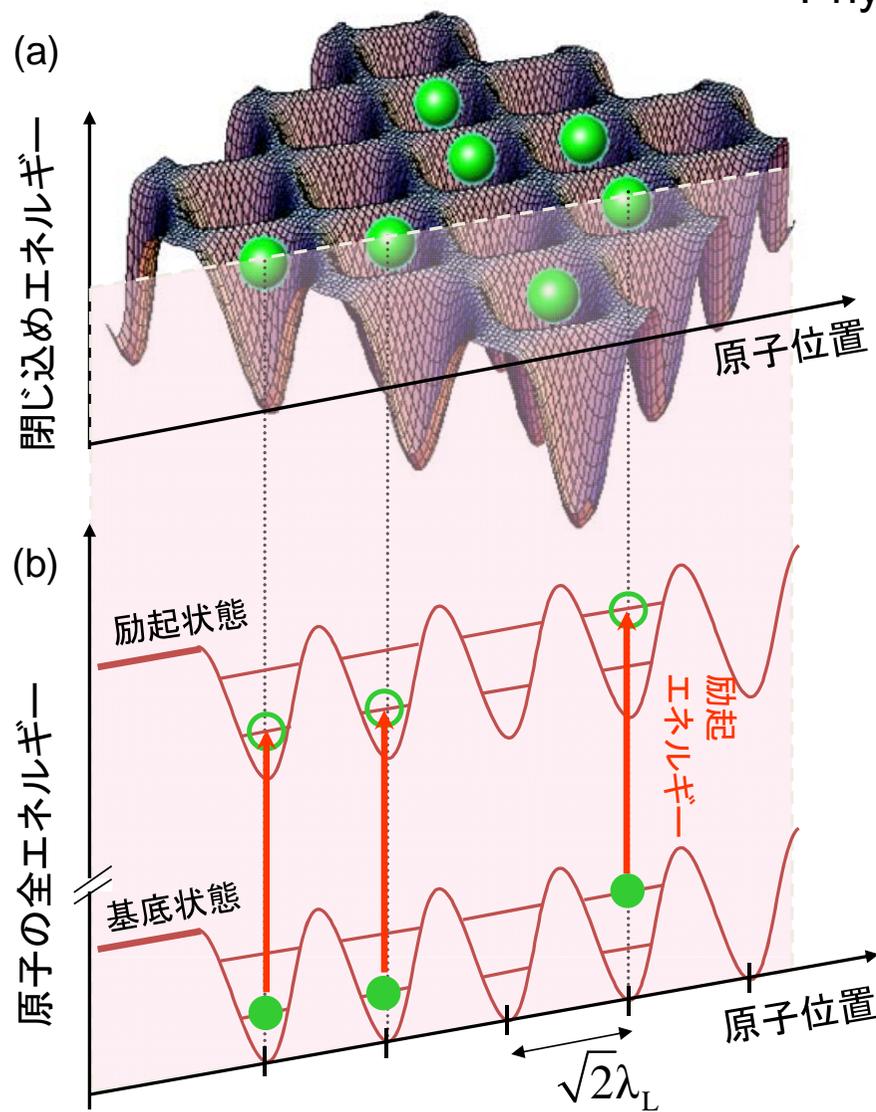
⇒原子間相互作用を排除：単一原子時計100万台と等価

強い摂動下で、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！

18桁精度の新しい原子時計“光格子時計”の実現可能性

Katori, FMS (2001)

Katori, Takamoto, Pal'chikov & Ovisannikov,
Phys. Rev. Lett. 91,173005(2003)



トラップ光の摂動を、光を特定の波長“魔法波長”に合わせて相殺する

- 周波数依存性

- $\frac{d\nu_{ac}}{d\omega_L} = -1 \text{ mHz/MHz}$

- トラップレーザー周波数を9桁で決めれば、18桁精度の時計が実現！

- 偏光依存性

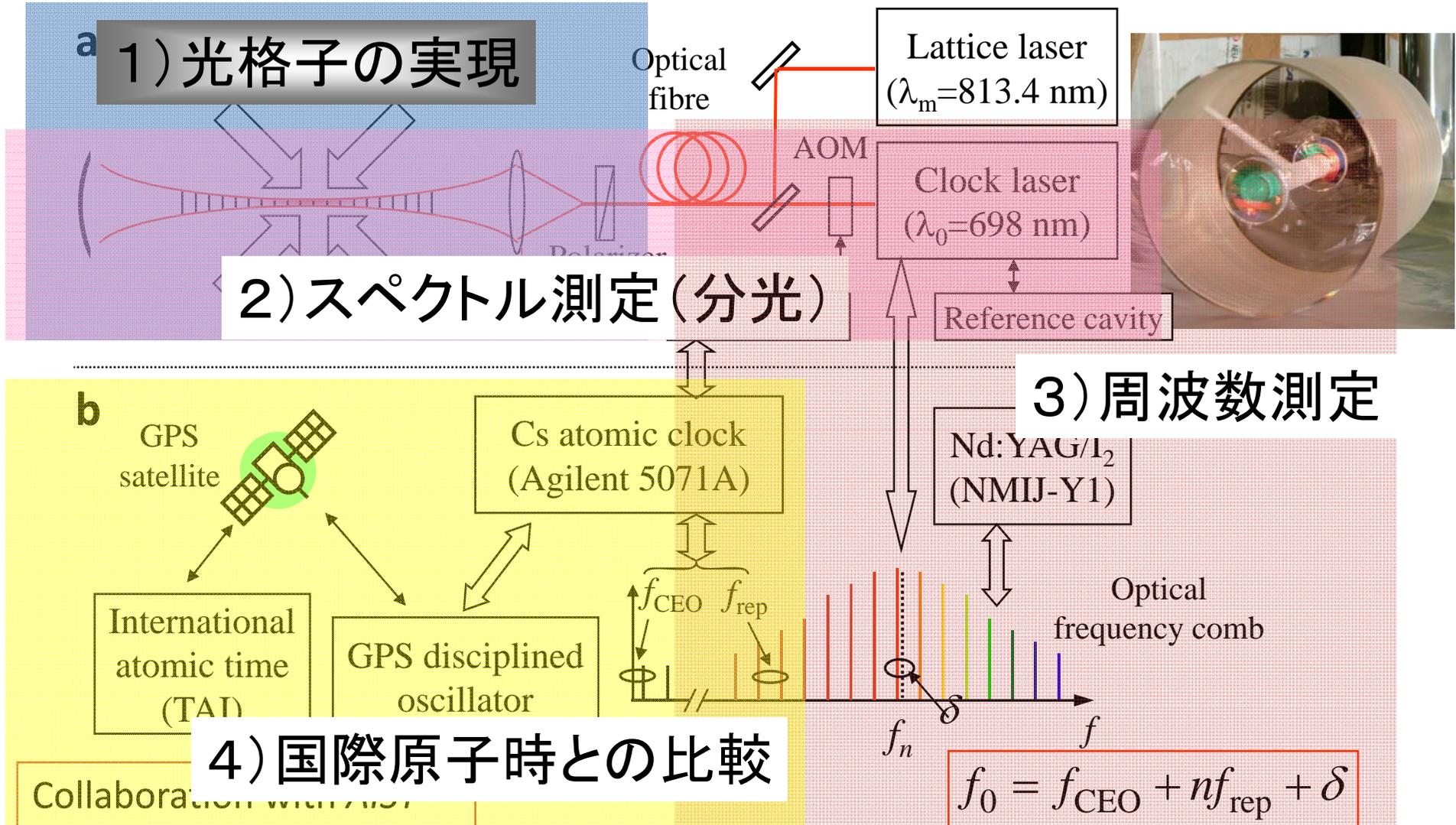
- 高次の光シフト

- mHzオーダー

実験

—Sr原子の光格子分光(2003)・光格子時計(2005)へ—

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



(1次元)光格子時計の実現(2005) LETTERS

An optical lattice clock

Ichichi Higashi¹ & Hidetoshi Katori^{1,2}

ネイ、ば、準、技、の、が、に、
イ、市、研、術、基、で、千、原

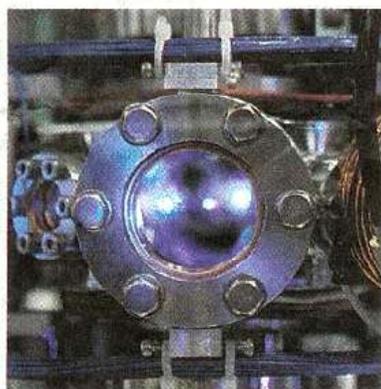
(2005年5月19日、
朝日新聞・朝刊)

科学誌が成功
計測標具つく
と産業時計
ることを一
をこ

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



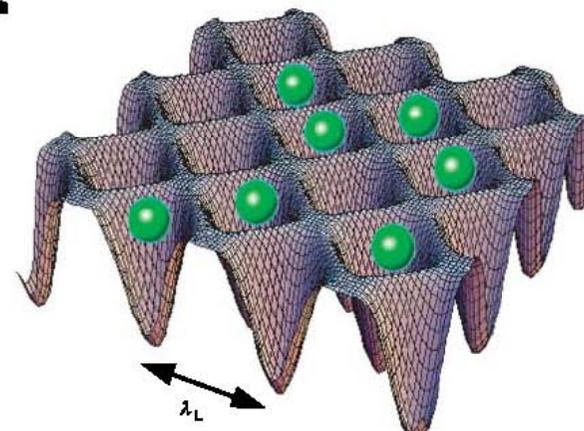
中央の小さな青い点が、極低温のストロンチウム原子を利用した光格子時計の心臓部=17日、東大工学部で

実現すれば、理論上、宇宙が誕生した137億年前から現在まで動き続けたとしても0.4秒も狂わない正確さになる。現在の1秒は、セシウム原子が吸収・放出する電磁波(マイクロ波)の振動数で定義されており、世界最高精度の原子時計は3千万年に1秒しか狂わない。しかし、同じ電磁波だが振動数が千倍ほど高い光なら、精度を千倍程度高めることができるため「光時計」の開発競争が続いてきた。東大の香取秀俊・助教らは、絶対零度近くまで冷やしたストロンチウム

... is a prerequisite for navigation with a fractional frequency comb between optical traps. 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^{16,17}. The transition frequency ν of a narrow atomic transition is insensitive to the lattice depth. An indicator of the lattice depth which is minimized for the ν transition. The

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

report a different optical lattice serve as a demonstration that observed for the Sr lattice is better than that predicted by an optical

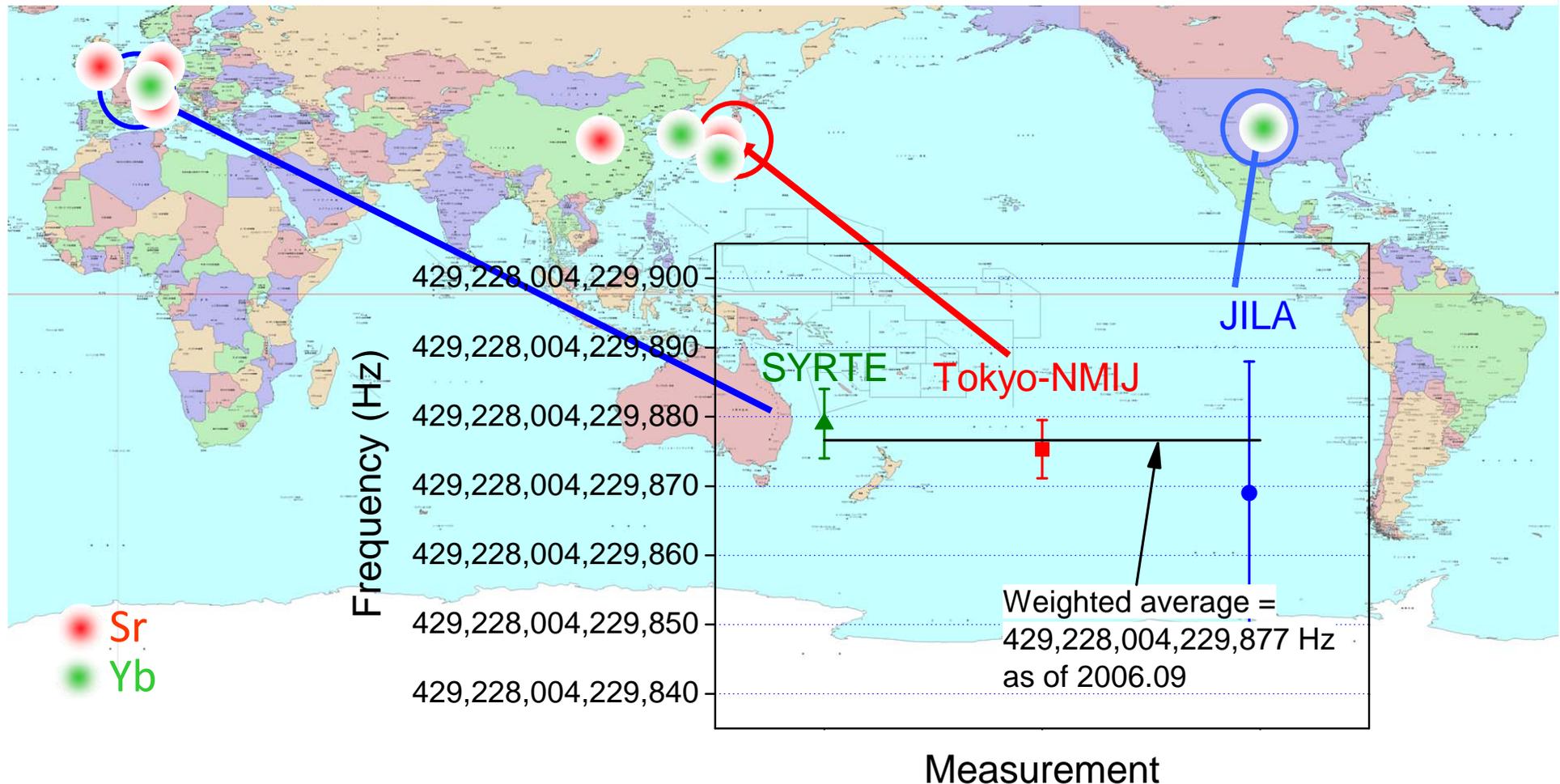


最近のNatureジャーナル誌に掲載されたフォトニクス関連論文のハイライト

Natureには、量子光学や測定学からレーザー、ディスプレイ技術に至る幅広いトピックに関する世界最高のフォトニクス関連論文を数多く発表してきた歴史があります。ここには、過去50年間の画期的な論文が集められており、ルビーレーザーの最初の試作品を説明したTed Maimanの論文(1960年)から始まっています。それから30年後、ポリマーLEDという新しいタイプの光源について記述したJeremy Burroughesの論文が1990年のNatureに掲載されました。彼の研究は、のちに英国企業 Cambridge Display Technology (CDT)によって商品化されました。その後も電子インキに関する先駆的研究(1997年)、初めての単原子レーザー(2003年)、そして非常に精度の高い光学時計の作製技術(2005年)がNatureにおいて発表されました。

「運動する時計は時間の進み方が変わる」というアインシュタインの相対性理論の効果も検出可能。「光時計を持って歩けば、止まっている時計との比較で遅れがわかるはず」と香取助教。

光格子時計手法の世界的広がり 「秒の二次表現」の採択(2006.10)



JILA: Ludlow, et al., PRL 96, 033003 (2006)

Tokyo-NMIJ: Takamoto, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 75, 104302 (2006).

SYRTE: Targat, et al., PRL 97, 130801 (2006).

秒の再定義に向けて

国際度量衡委員会の時間・周波数諮問委員会及び長さ諮問委員会が2004年に

“Joint working group on secondary representations of the second”

を設置し、「秒の再定義」に向け作業を開始

2006年10月：国際度量衡委員会「秒の二次表現」の採択

- | | |
|---------------------------------------|-------------------|
| 1. ルビジウム原子マイクロ波遷移 (6.834 GHz) | 伝統的手法 |
| 2. ストロンチウムイオン光遷移 (444 THz) | } 光時計
単一イオン光時計 |
| 3. 水銀イオン光遷移 (1064 THz) | |
| 4. イッテルビウムイオン光遷移 (688 THz) | |
| 5. 中性ストロンチウム原子光遷移 (429 THz) ⇒ “光格子時計” | |

◎2001年の提案からわずか5年で採択

次世代原子時計 の候補へ2006年10月

正式に承認

光格子時計は二〇〇一年、香取秀俊東京大助教が考案し、〇五年に香取助教らの研究グループが産業技術総合研究所（茨城県つくば市）との共同研究で開発に成功。今年十月、フランスで開催された計測単位の国際基準を管理する「国際度量衡委員会」で、一秒の長さを決める次世代の時計候補として正式に承認された。

現在、世界標準として使われている時計はセシウム原子を利用する原子時計で、一九六七年に採用された。数千万年に一秒しか狂

東大・香取助教ら開発

わないとされる。

一方、光格子時計はストロンチウムの原子が一秒間に約四百兆回振動する特定の振動回数（周波数）の光だけを吸収、放出する性質を利用し、その光の周波数を基に一秒を計ろうというものだ。

原子同士がぶつかる周波数が変化する問題が起これ、レーザー光で、周波数を一定に保つことに成功。この結果、大量の原子が吸収する光の周波数を一定に保って計測することが可能となったとい

一粒ずつ隔離

光格子時計では時計の精度を上げるために百万個も

原子を隔離する半面、原子が吸収する光の周波数を代わるためには、光格子

最有力候補

光格子時計 注目集まる

時計がセシウム原子時計より高精度であることを証明し、かつ世界で運用できる技術を普及させることが必要となる。しかし、現在の光格子時計の誤差は、セシウム原子時計に比べて及ばない数億万年に一秒だ。



光格子時計。指で示しているのがストロンチウム原子を配した中心部＝東京大学京大の東京大

100億年で誤差1秒 世界標準、採用にしのぎ

究極の光格子時計をデザインする

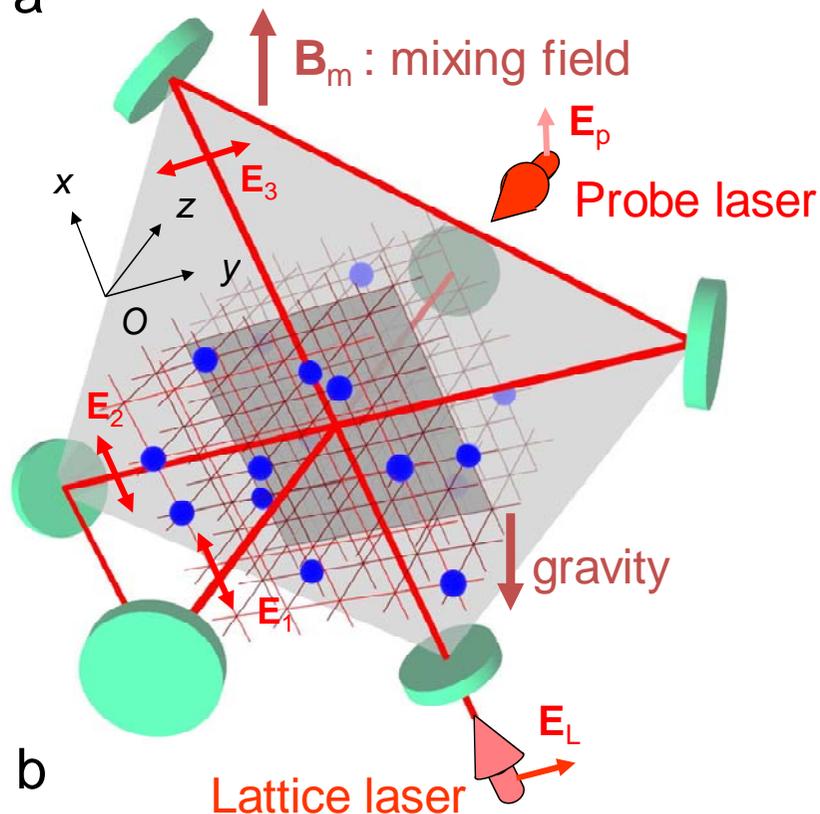
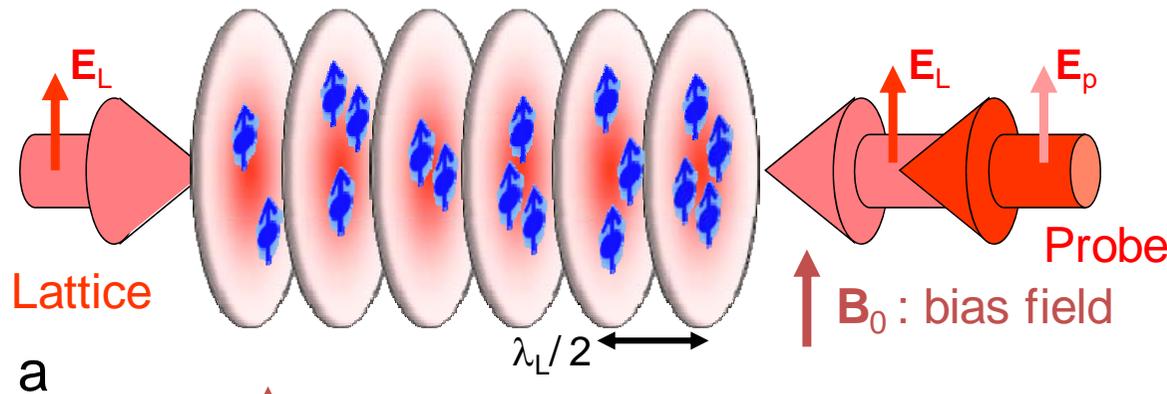
被観測原子の量子統計性・光格子の幾何学の検討
(原子の角運動量と光格子電場偏光との結合)

		Quantum statistics	
		Fermion ($F \neq 0$)	Boson ($J = 0$)
Lattice geometry	1D (2D)	◎ Pauli blocking (Spatially uniform polarization)	× Cold collisions $1 \leq g^{(2)} \leq 2$
	3D	△ vector shifts? (Polarization rotation of lattice)	◎ Mott insulator state ◎ Better S/N? (Larger # of atoms)

Atoms in a site

Single occupancy lattice

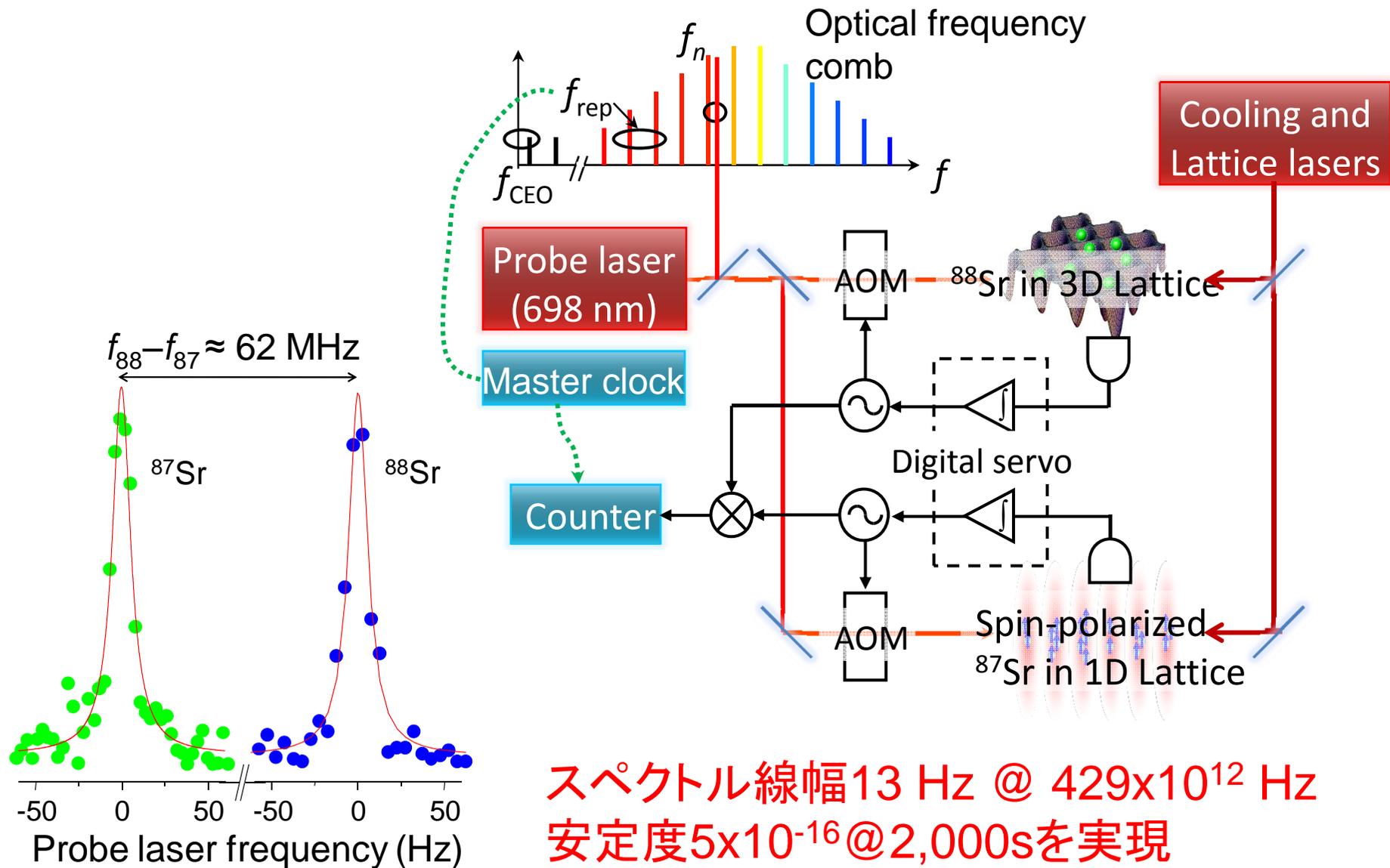
フェルミ粒子を用いる「偏極1次元光格子時計」とボース粒子を用いる「3次元光格子時計」



- 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

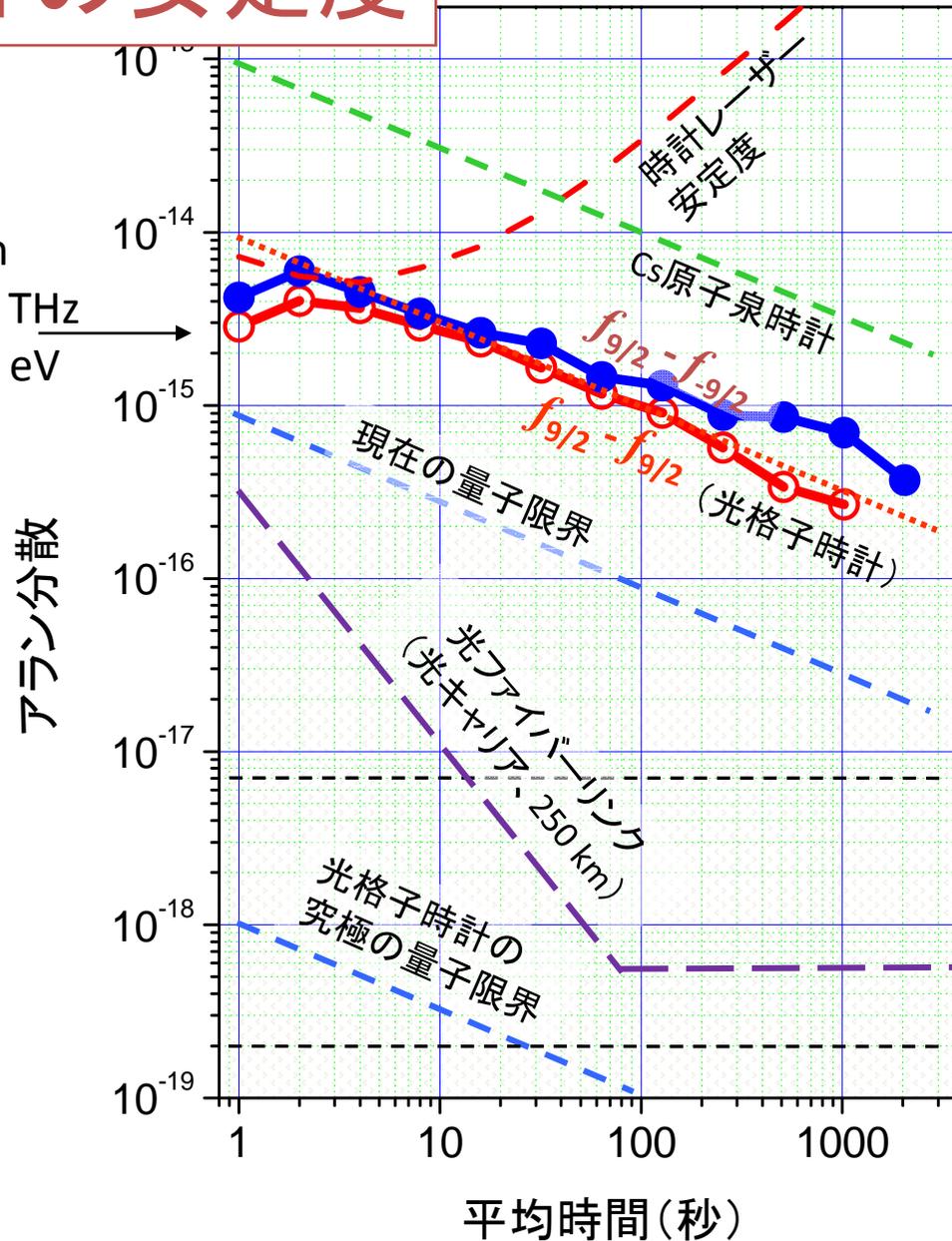
2台の光格子時計の周波数比較

—SIリミットを越える周波数比較の実現—



時計の安定度

Clock transition
1 Hz/430 THz
5 feV/1.8 eV



$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N\tau}}$$

- ← 国際原子時 (TAI)
- 光ファイバーリンク (振幅変調、86 km)
- ← 月潮汐
- ← 太陽潮汐
- ← Srの黒体輻射シフトの不確かさの限界
- ← 重力赤方偏移 (高度差1cm)
- ← Hgの黒体輻射シフトの不確かさの限界

主要成果(2003-2008)

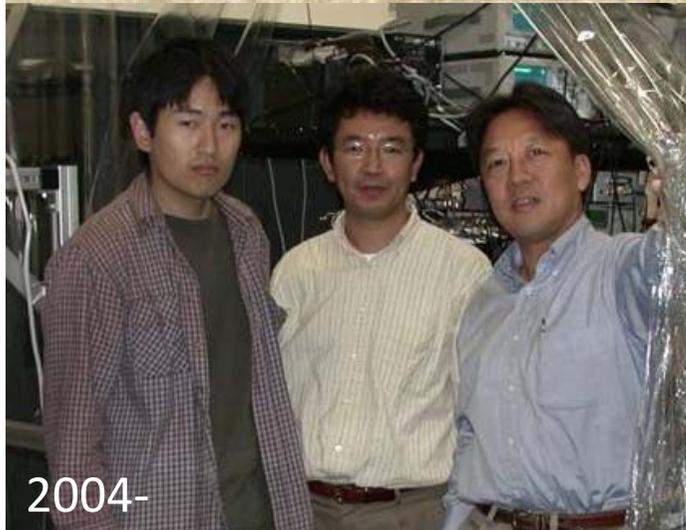
- 光格子時計の提案・実証
 - 摂動のエンジニアリングによる、新しい原子時計手法
 - 提案: Katori et. al, Phys. Rev. Lett. (2003).
 - 実証: Takamoto et al, nature (2005).
- 国際度量衡委員会「秒の二次表現」: 2006年10月
 - 日・米・仏グループの光格子時計実験の一致
 - 秒の再定義に向けた布石
 - 世界10以上の研究機関が「光格子時計」開発に参入
- 光格子のデザイン: 量子統計性と光格子の幾何学
- 光格子時計の相互比較
 - 5×10^{-16} の安定度の実現: TAIリミットを越えて
- 国際的評価の獲得
 - EFTF prize (2005), Julius Springer Prize (2005), Rabi award(2008)

The group

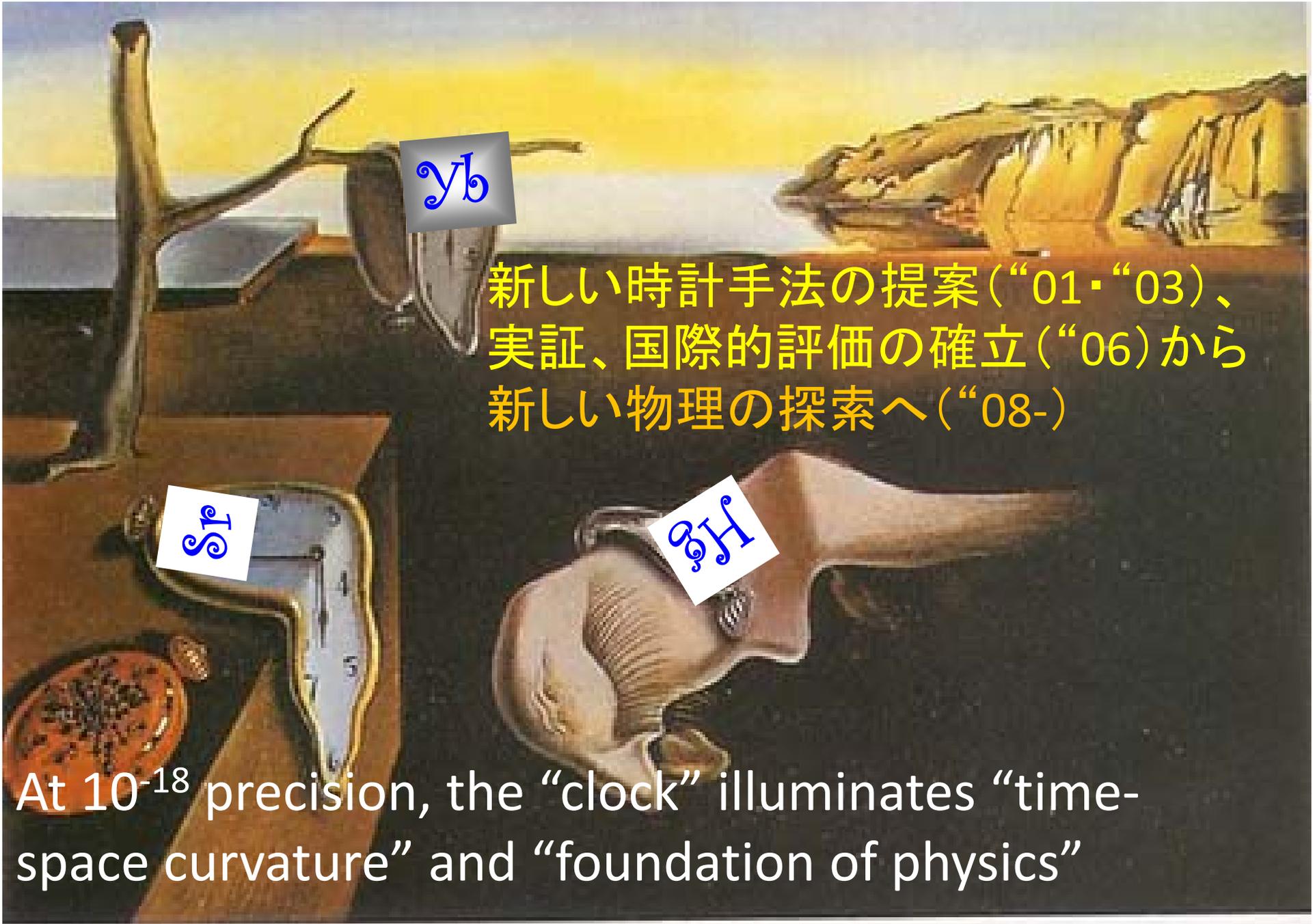


Univ. of Tokyo/CREST
H. Katori
M. Takamoto(RA:Sr-1D)
H. Hachisu
(JST/PD: Hg, atom chip)
T. Akatsuka (JST/Sr-3D)
R. Higashi (D3:Yb)
K. Hamada (M2: chip)
K. Miyagishi (M2:Hg)
Y. Nakagawa (M1:Yb-Sr)
K. Nakahana (M1:Sr)

AIST/NMIJ (Freq. Link)
F. L. Hong
M. Imae
Y. Fujii



Funding: SCOPE(03-08), PRESTO, CREST



yb

新しい時計手法の提案 (“01・“03)、
実証、国際的評価の確立 (“06)から
新しい物理の探索へ (“08-)

Sr

H

At 10^{-18} precision, the “clock” illuminates “time-space curvature” and “foundation of physics”

The Persistence of Memory, 1931 : Salvador Dalí