





ナトリウム?

ストロンチウム?

バリウム・銅?

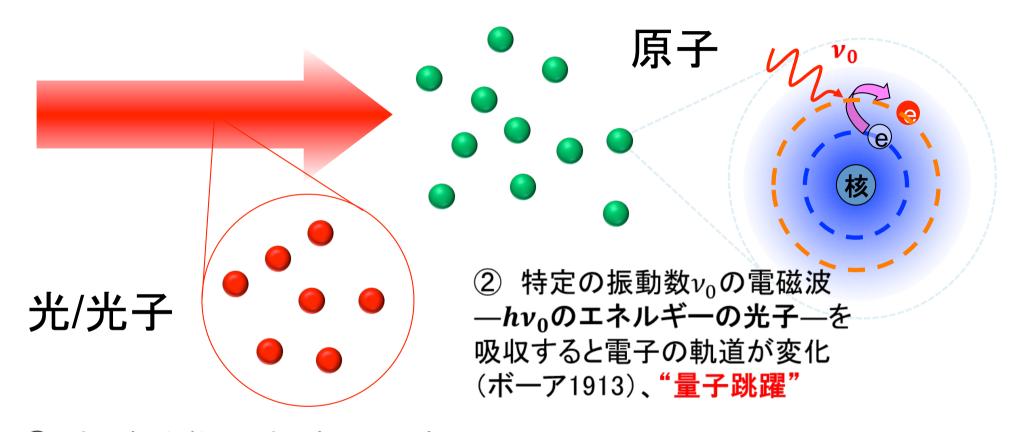
???

炎色反応・原子のスペクトル

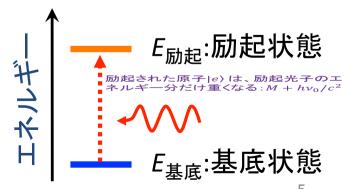
赤い光:1秒間に450,000,000,000(4百兆)回光の波が振動する

花火の色は原子の色(=光波の振動数)原子の振り子を正確に数えて時間を測る

### 量子の世界へ:光と原子、波動性・粒子性、原子時計



- ① 光は振動数νの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年)
- ③ 原子時計ではこの原子の「振り子の**振動数**」  $\nu_0$ を正確に測定、振動数の基準とする



# 時計の精度

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{10 \text{ s}}{1 \text{ yr.}} = \frac{10 \text{ s}}{60 \times 60 \times 24 \times 365 \text{ s}} \approx 3 \times 10^{-7}$$
 (高精度腕時計、水晶の振動、1秒に約3万回)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{3000 \text{ 万年}} \approx 1 \times 10^{-15}$$

(国際原子時、セシウム原子の振り子、1秒に9億回)

$$\frac{\Delta t}{t} \approx \frac{1 \text{ s}}{2 \times 138 \text{ 億年}} \approx 1 \times 10^{-18}$$

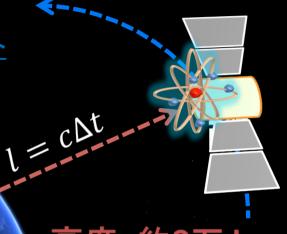
(光格子時計、ストロンチウムの振り子、1秒に4百兆回)

## 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<u>進み</u>

<u>方が遅れる</u>:-8.4 × 10<sup>-11</sup>



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<u>進み方</u>が速くなる: +5.27 × 10<sup>-10</sup>

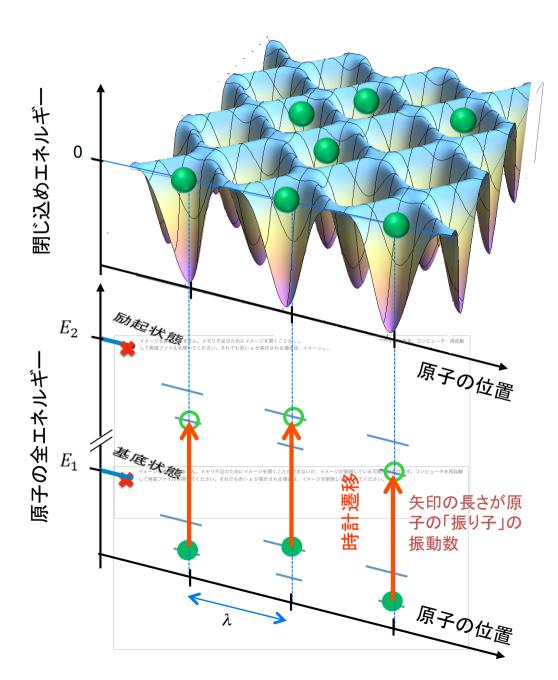
特殊相対論と一般相対論で逆の寄与。 合計で $+4.43 \times 10^{-10}$ の相対論的補正

Google earth



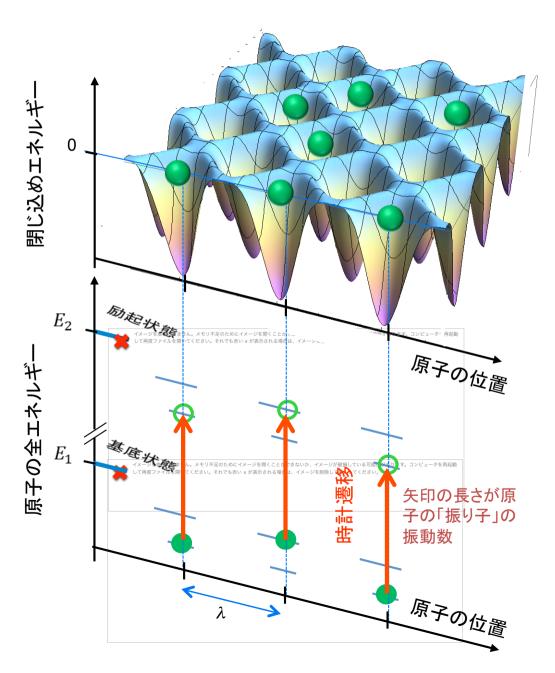
The Persistence of Memory(記憶の固執), 1931: Salvador Dalí

# 光格子時計: 奇想天外な企て



光で「原子の魔法の箱」を 作って、

## 光格子時計: 奇想天外な企て



光で「原子の魔法の箱」を 作って、「原子の振り子」に気 付かれないように原子をつか んで運動を凍結

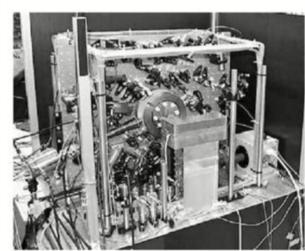
- ドップラー効果をゼロに
- 多数個の原子を同時に 観測
- 高精度原子時計のブレイクスルー

2001年、香取 Frequency Standards and Metrology Symposium(原子時計の国際会議)で提案

## 2台の光格子時計を比較する



#### 誤差「160億年に1秒」の時計 東大などのグループ開発



2台の時 確認した光格子時計=理化学研究 今の1秒

光格子時計と呼ばれる時計を開発 れる電磁波の影響を受け振動数が一 する東京大学などの研究グループ が、160億年に1秒しか狂わない極 た。実験で確認された中では世界最 170度まで冷やした。 高の精度という。9日付の英科学誌 ネイチャー・フォトニクスに論文が の電磁波の振動数で決まっており、 掲載された。

秀俊氏ら。光格子時計は原子時計の み、国際度量衡委員会が新たな定義 一種で、レーザーで10万分の23ッ程 度の格子状の空間にストロンチウム 原子を閉じ込めて振動数を数える。 これまでは原子を囲む壁から放出さた」と話している。

定にならなかった。そこで電磁波の 影響を受けにくい低温環境で作動す めて高い精度を達成したと発表し る光格子時計を開発。セ氏マイナス

現在の1秒の定義はセシウム原子 3千万年に1秒狂うという精度。だ 開発したのは、東京大教授の香取 が、より精度の高い時計の開発が進 づけを検討。今回の成果は検討に影 響を与えそうだ。香取教授は「理論 的な限界に迫る高い精度が確認でき (野瀬輝彦)

ν<sub>87Sr</sub> = 429 228 004 229 873.2 Hz(16桁)までしか測れない 新しい時間の定義が必要!(10年後くらいにきっと実現)



ダリの「やわらかい時計」の使い方

# 原子時計で高さが測れる地球に近い時計は重力のせいでゆっくり進む

17.7.3

## 光ファイバーで時計をつないで

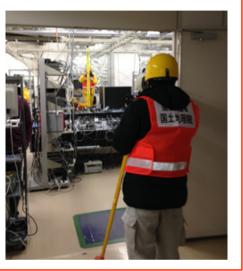


#### 水準測量とアインシュタインの相対論の対決

国土地理院と光格子時計、どちらが標高差を上手く測れるか?

理研の光格子時計

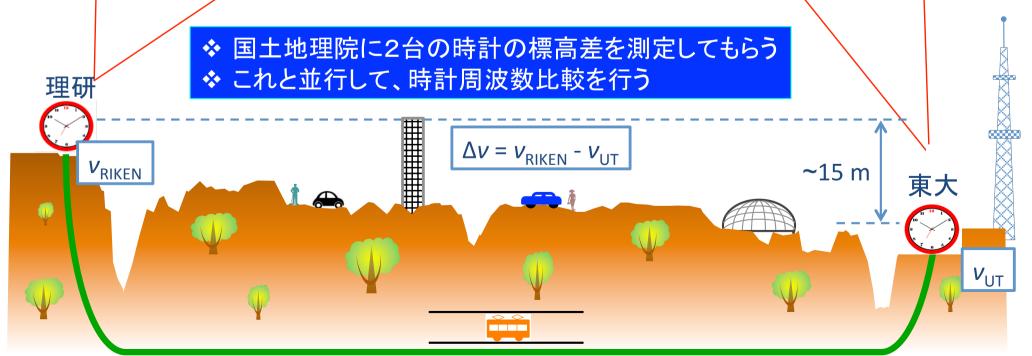






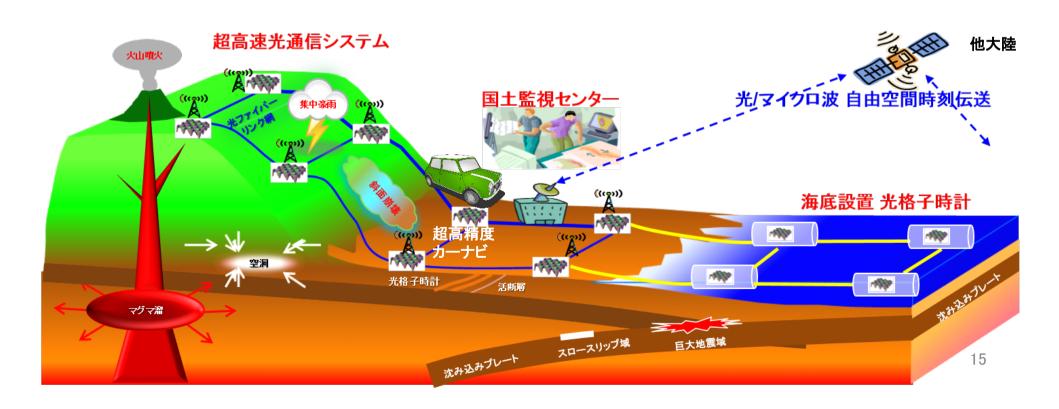
東大の光格子時計





### 未来の時計はどうなるだろう?

- 興味本位(Curiosity driven)に、新型原子時計の可能性を考案して、突き詰めていったら、 世界最高性能になった。
- サイエンスの言葉の多くは欧米から輸入。日本が、新しい「秒の定義」に貢献にしよう。
- Internet of Things(IoT)→Internet of Clocks (IoC)って考えてみよう
- ダリのやわらかい時計って、地下の構造を見る仕掛けになるかもしれない
- スマホやカーナビの位置情報を握る、GPSのシステムは、米ソ冷戦下の、アメリカの軍事技術。これに頼り切っていて大丈夫?



#### Time for detection

Rana Adhikari, Paul Hamilton and Holger Müller

## Hunting for topological dark matter with atomic clocks

**Nature Physics** 

A. Derevianko<sup>1\*</sup> and M. Pospelov<sup>2,3</sup>

**PUBLISHED ONLINE: 17 NOVEMBER 2014** 

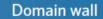
# 原子時計でダークマターが見えるかもしれない。まだ物理学にも分からないことが、山ほどある。

原子時計は一番精密な測定ツールなので、見えるとすれば原子時計しかない。

□ 原子のスペクトルを頼りに、手探りで 原子モデルを作って、量子力学の体 系を築いた19~20世紀初頭の分光等 と酷似

□ 原子時計はNew Physicsの幕開けの 最もエキサイティングな時代の主役







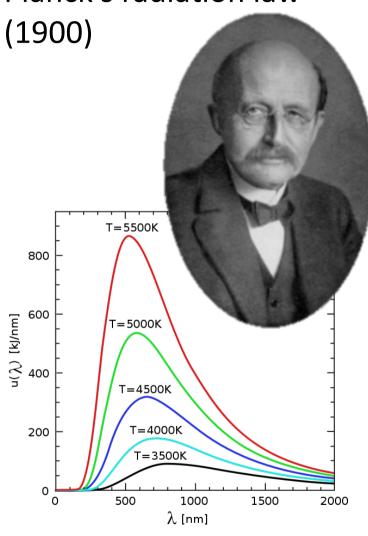


### 直近の工学要請から最先端の物 理が拓かれる

→工学と科学の進歩は表裏一体

19世紀末のドイツの鉄鋼業の要請から、溶鉱炉の評価。そのスペクトルの研究から、光子が見つかった→量子論の創設へ。 今や、量子技術なくして、我々の生活はない。

工学が加速した光格子時計は、きっと新しい、 物理学を見つけるだろう。 Planck's radiation law



$$u(\nu,T) = \frac{4\pi}{c} I(\nu,T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \; \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \label{eq:u}$$

## 結局、工学って何?

- 誰もやってない、自分でやるしかない、独自のアイデアを 思いつこう。例えば、究極を目指そう。
- サイエンスを楽しむだけじゃなくて、どうやったら、人類、社会に役立つか考えよう。
- 奇想天外なアイデアで、奇想天外な未来の社会が実現できたらいいな…新しい物理の法則が見つかったら最高!
- セシウム原子時計が発明されたのは1955年。カーナビや、もうすぐ始まる車の自動運転を誰が想像しただろう?
- ダリの「歪んだ時計」が社会に実装されると、どうなるだろう?
- 「正確な時計」って何だろう?重力で時空間が歪んでいるから、離れた二人が同じ時間を共有するって難しい。
- 工学は、常識を変え、新しい常識を作る。