

# 長さの定義改定がもたらした 長さ計測の進展

電気通信大学大学院 情報理工学研究科  
基盤理工学専攻 教授  
JST, ERATO 研究総括  
日本学術会議連携会員  
美濃島 薫

# メートルの定義の変遷

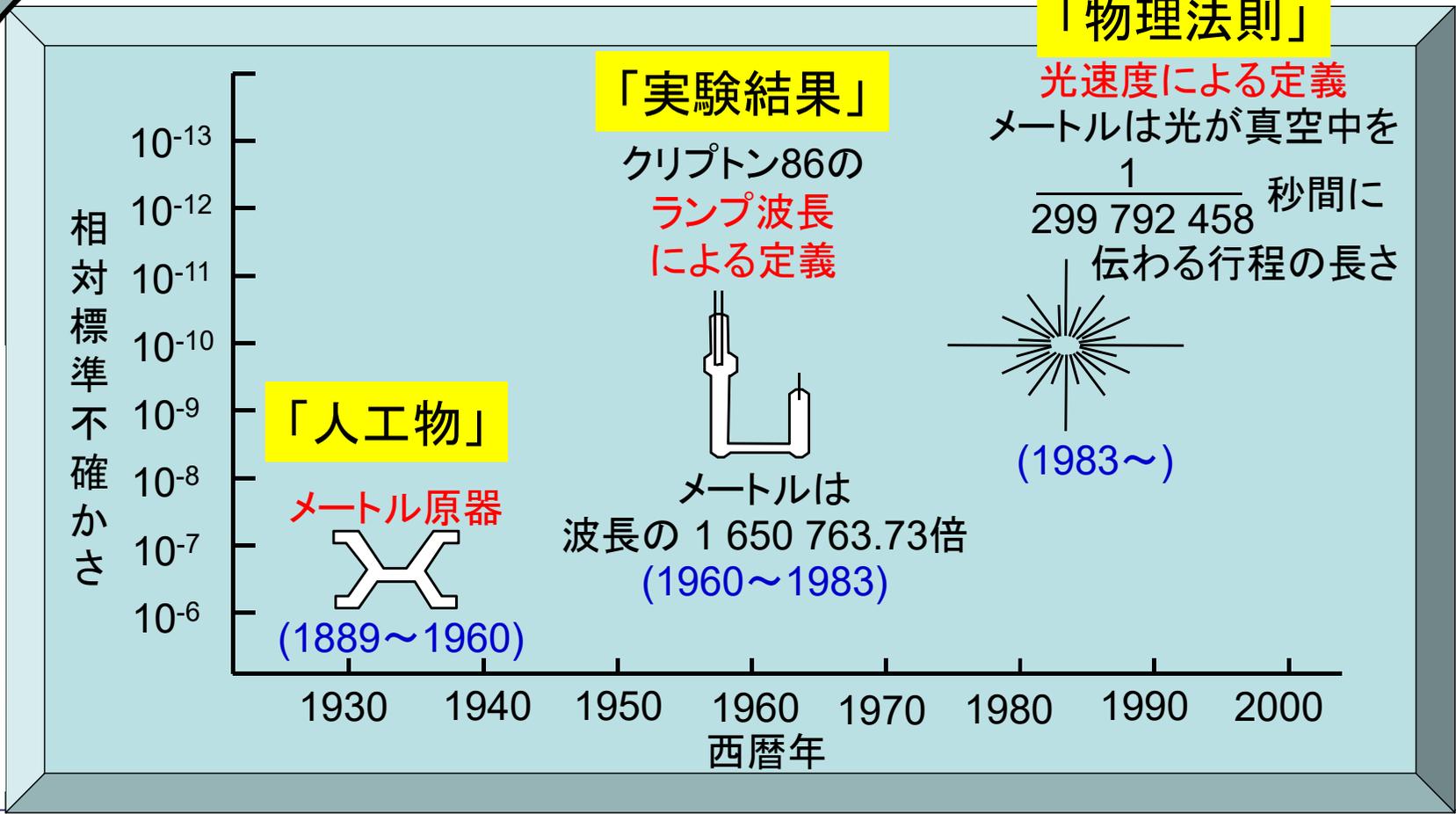
「もの」から物理現象へ  
実現法の高精度化へ  
基準の民主化

「光速」：“光”そのものが定義

$C=299792458 \text{ m/s}$   
「憎くなく 二人寄れば  
いつもハッピー」

- ・いつでも
  - ・誰でも
  - ・どこでも
- “同じ定義”

2012年4月、  
重要文化財に指定



世界共通の基準へ  
近代化の始まり

# “光”によるメートルの定義の実現

## メートルの実現方法 (CIPM勧告、1983年)

### ① 時間測定 (パルス法)

$$l = c \cdot t$$

### ② 波長測定 (干渉法)

$$\lambda = c / f$$

### ③ 放射リストの値を使う

Table 8. (unit: MHz; s: estimated standard deviation)

$\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $^{127}\text{I}_2 \text{ R}(127) 11-5$

Reference: component i ( $a_{13}$ ),  $f = 473\,612\,214.8 \text{ MHz}$  [1]

| Component | $f(a_n) - f(i)$ | s        | Component | $f(a_n) - f(i)$ | s |         |       |
|-----------|-----------------|----------|-----------|-----------------|---|---------|-------|
| $a_2$     | t               | -582.9   | 0.5       | $a_{12}$        | j | -21.565 | 0.005 |
| $a_3$     | s               | -558.9   | 0.5       | $a_{13}$        | i | 0       | -     |
| $a_4$     | r               | -320.6   | 0.1       | $a_{14}$        | h | 21.939  | 0.005 |
| $a_5$     | q               | -292.7   | 0.5       | $a_{15}$        | g | 125.694 | 0.005 |
| $a_6$     | p               | -290.3   | 0.5       | $a_{16}$        | f | 138.892 | 0.005 |
| $a_7$     | o               | -263.0   | 0.1       | $a_{17}$        | e | 152.255 | 0.005 |
| $a_8$     | n               | -162.814 | 0.005     | $a_{18}$        | d | 165.116 | 0.005 |
| $a_9$     | m               | -153.801 | 0.005     | $a_{19}$        | c | 283.006 | 0.005 |
| $a_{10}$  | l               | -137.994 | 0.005     | $a_{20}$        | b | 291.100 | 0.005 |
| $a_{11}$  | k               | -129.950 | 0.005     | $a_{21}$        | a | 299.931 | 0.005 |

Metrologia 19, 163-177 (1984)

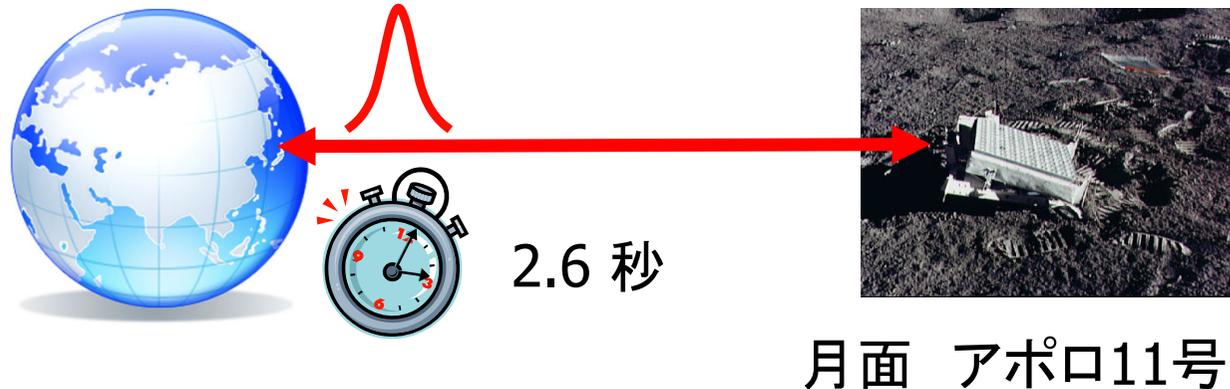
# “光”によるメートルの定義の実現:

## ①時間測定

光で月までの距離を測る

距離 = 速度 × 時間

パルスレーザーを月まで往復  
384,400 km



- 定義を直接的に実現できる
- パルスの飛行時間の高精度測定が必要

当時の  
技術では

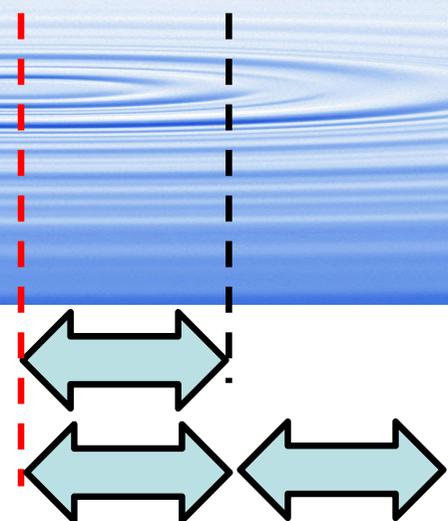
➡ しかし、超短時間を直接測定するのは難しかった  
(一瞬の時間を切り取る必要)

➡ 超長距離測定のみ有効とされた

# “光”によるメートルの定義の実現:

## ②波長測定

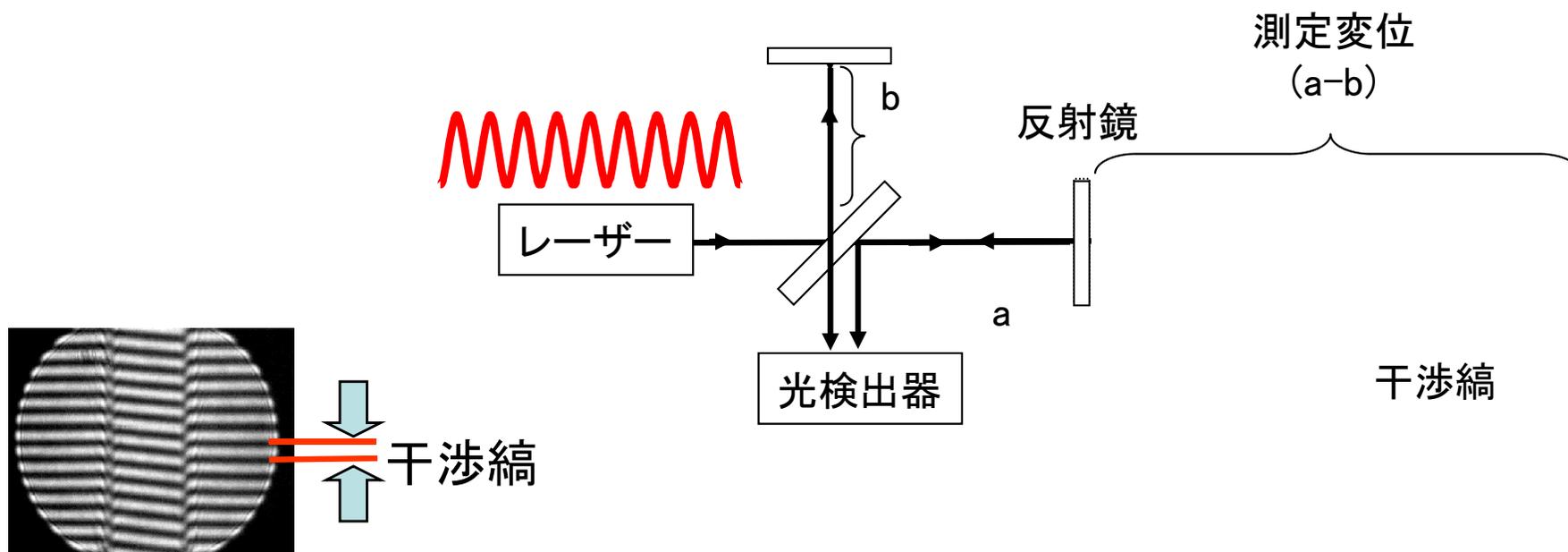
縞模様の間隔「波長」が、  
物差しが目盛



$$\text{「距離」} = \text{「波長」} \times \text{「数」}$$

# 光の波で長さを測る：干渉計

- 「干渉」：反射鏡の位置に応じて、光の強度が明滅。  
その数を測定して、高精度に鏡の位置を知ることができる

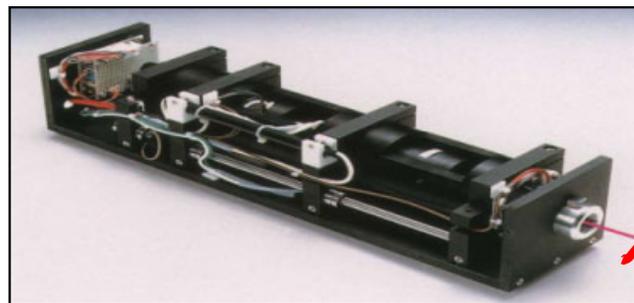


➡ 精密な測定に広く用いられている

# “光”によるメートルの定義の実現:

## ②波長測定

「レーザーの波長測定」が中心となった



<https://www.nmij.jp/library/units/length/>



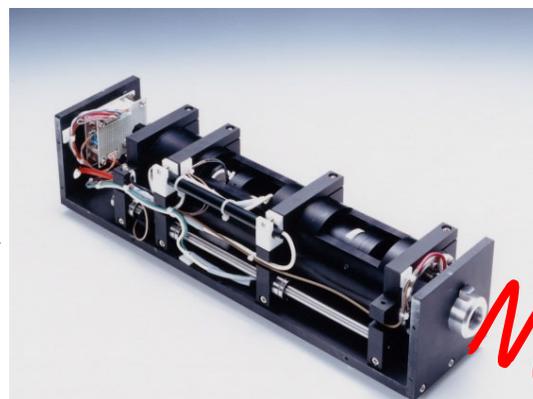
➡ しかし、レーザーの周波数を精密に決める必要がある

# 光の絶対周波数測定は難しい！

- レーザーの周波数は、非常に高周波
  - 通常のエレクトロニクスの装置で測れない
- 秒の定義(周波数標準)はマイクロ波 (GHz)

$10^{14}$ - $10^{15}$  Hz  
(THz, PHz)

Absolute frequency 473.755480000000 THz



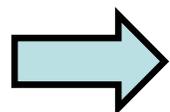
<https://www.nmij.jp/library/units/length/>

Frequency standards



9.192631770 GHz

「速度」=「波長」×「周波数」  
HeNeレーザー 波長 633nm

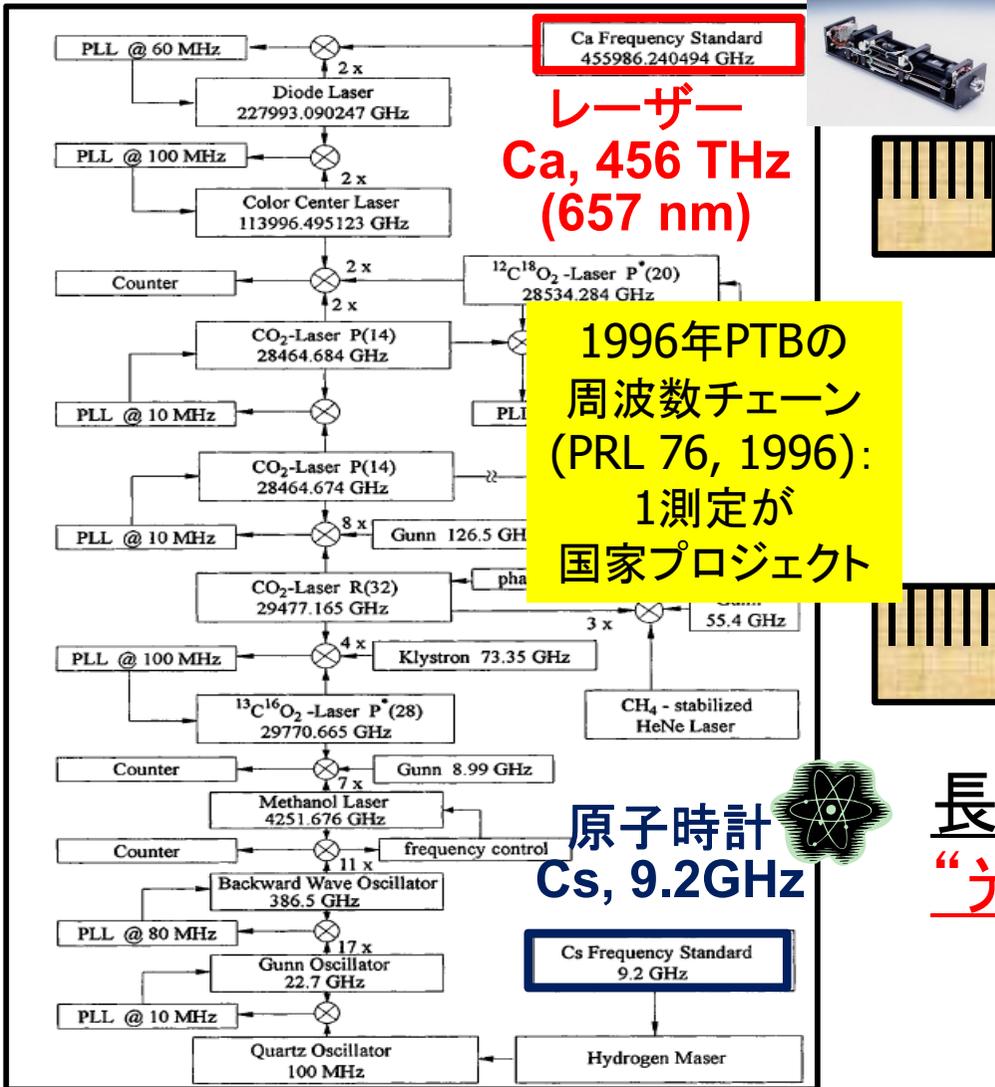


実際は、③放射リストの値が使われていた

# 絶対光周波数計測

短い物差しをつないでいくようなもの

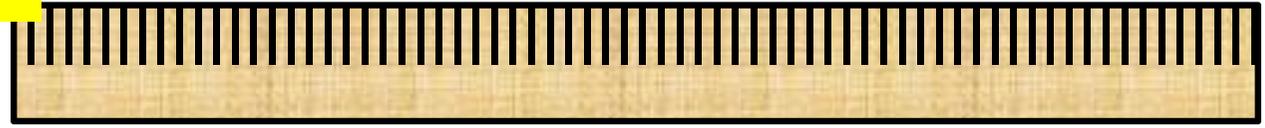
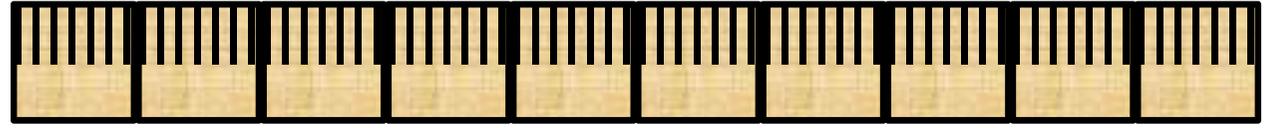
「レーザー周波数測定」のための  
努力が行われた



レーザー  
Ca, 456 THz  
(657 nm)

1996年PTBの  
周波数チェーン  
(PRL 76, 1996):  
1測定が  
国家プロジェクト

原子時計  
Cs, 9.2GHz

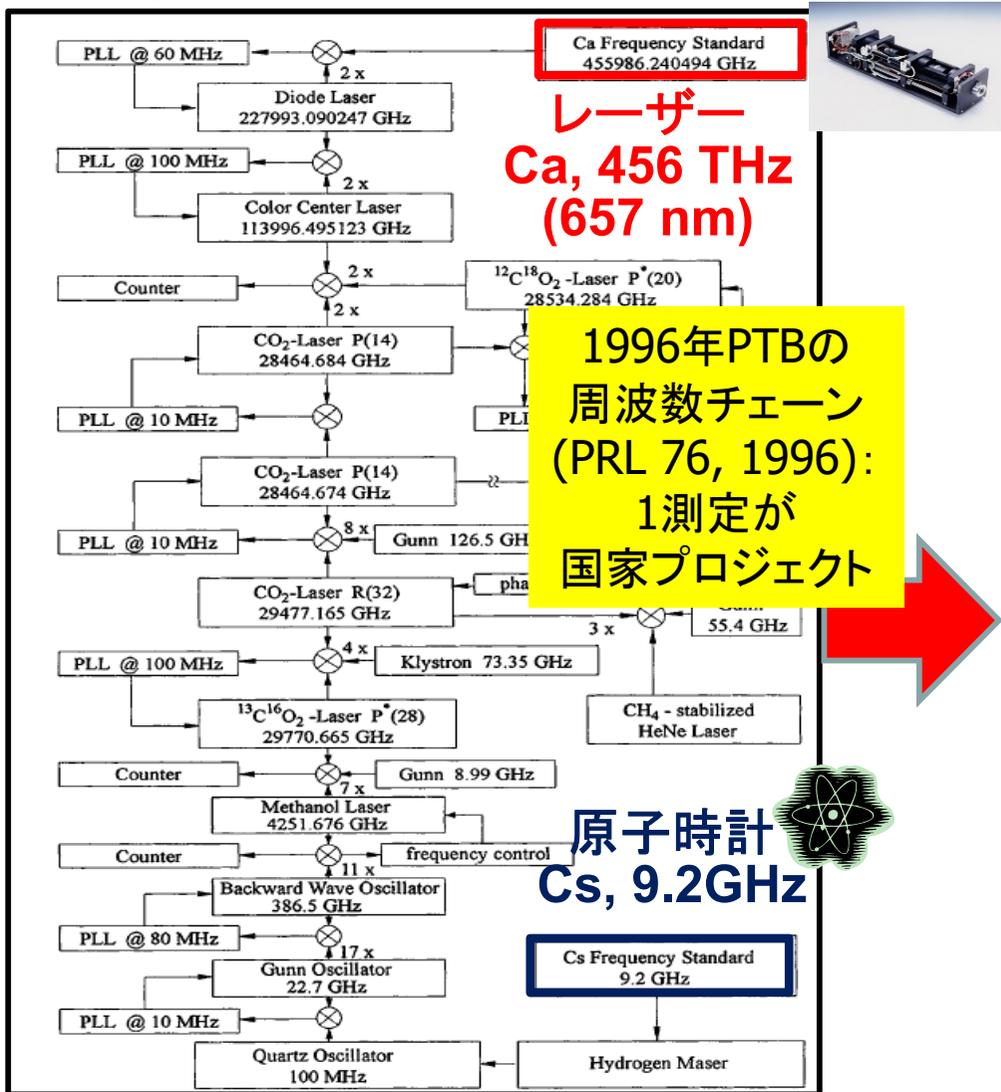


長くて正確な、周波数絶対値の付与された  
“光の物差し”が待望されていた

H. Schnatz et al., Phys. Rev. Lett., 76, 18 (1996)

# 絶対光周波数計測

短い物差しをつないでいくようなもの



H. Schnatz et al., Phys. Rev. Lett., 76, 18 (1996)

“光(周波数)コム”



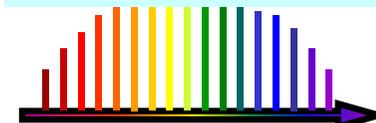
被測定レーザー  
PHz~THz

コム技術:  
1台で任意波長。  
大学院生の実験

測定



光コム:  
究極の物差し



制御

時間周波数標準(原子時計)  
9.2 GHz

「光の世界のイノベーション」

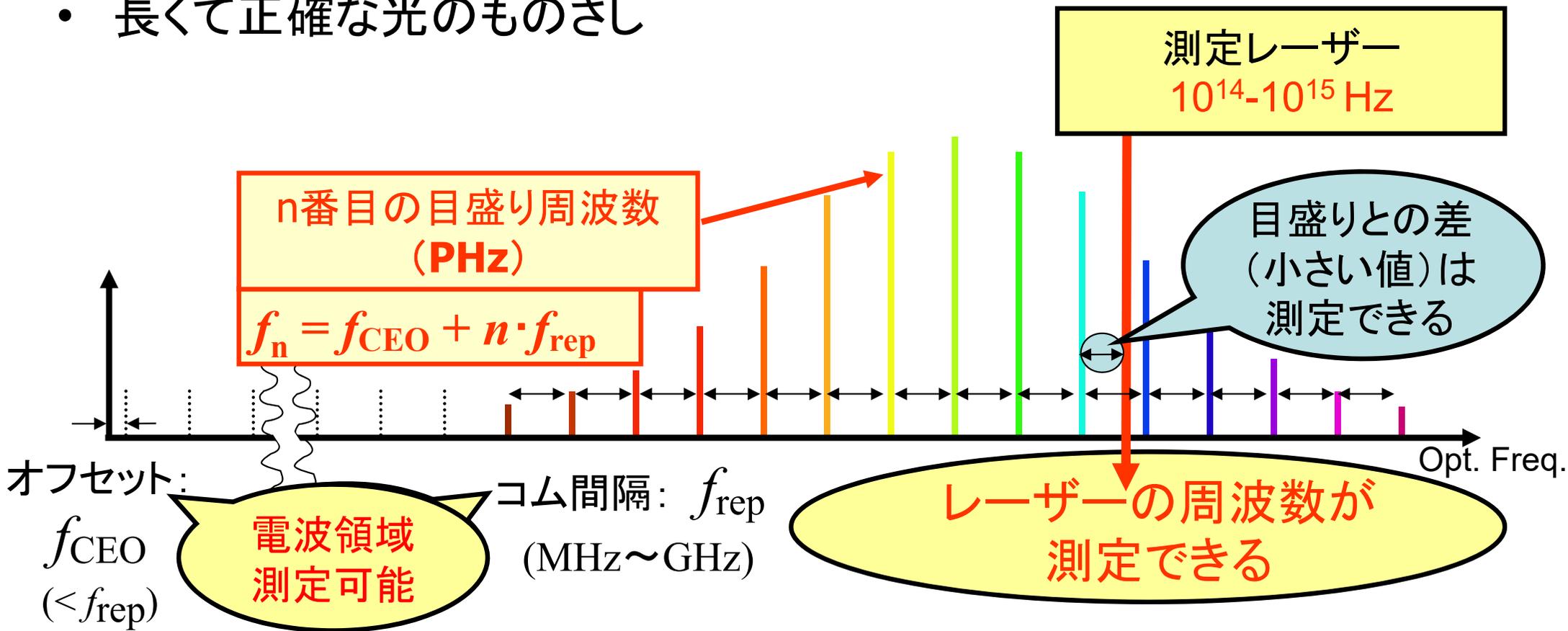
- **簡単、正確、広範囲**

T. Udem et al., Phys. Rev. Lett., 82, 3568 (1999)  
D.J. Jones et al., 288, 635 (2000)

ただの楕型スペクトル  
ではない

# 光コムは「光のものさし」: 光周波数のものさし

- 長くて正確な光のものさし



1999年に絶対計測が初めて実現。20世紀中には3カ国のみ。独、米、日

# 「秒」と「メートル」がつながった

電波の領域

統一の実現へ！

光波の領域

9 192 631 770 Hz

1 GHz

1 THz

1 PHz

最も精密に  
定義されている

原子時計



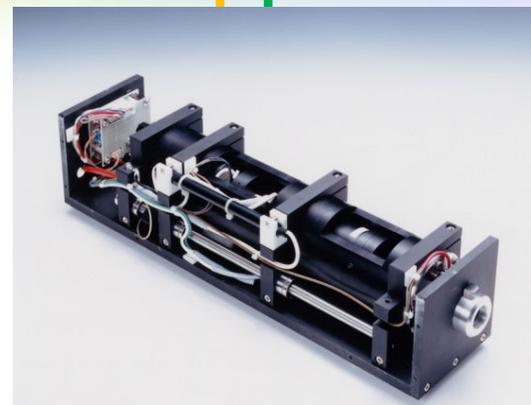
[http://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2003/pr20030609/pr20030609.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2003/pr20030609/pr20030609.html)

S

時間(周波数)標準

様々な分野で  
応用されている

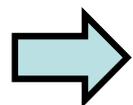
レーザー



<https://www.nmij.jp/library/units/length/>

m

長さ(波長)標準



広範な周波数帯をコヒーレントにリンク

# 2005年ノーベル物理学賞

Nobel Prize in Physics in 2005      shared with Roy J. Glauber

Dr. Theodor W. Hänsch  
(MPQ, Germany)

Dr. John L. Hall  
(JILA/NIST, USA)

*"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the **optical frequency comb technique**"*

「**光周波数コム技術**」を含むレーザーを用いた精密分光への貢献

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2005/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/)

# メートルの定義の変遷

波長(任意) (秒の定義)

2009年7月、日本の国家標準改定。  
“日本の全ての物差しの基準”が  
変わった!



“光コム”(光周波数コム)

高精度  
300倍!



「速度」=「波長」x「周波数」  
HeNeレーザー 波長 633nm

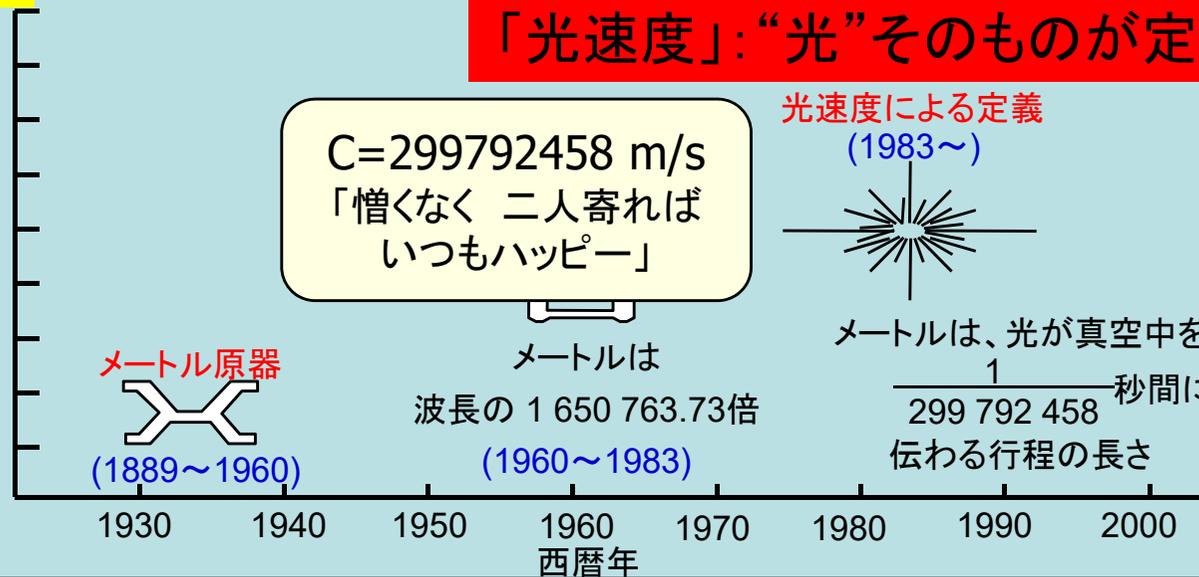
“連続波レーザー”

「光速度」: “光”そのものが定義



日本国メートル原器  
(1889~1960)

相対標準不確かさ



# 単なる「周波数ものさし」の先へ

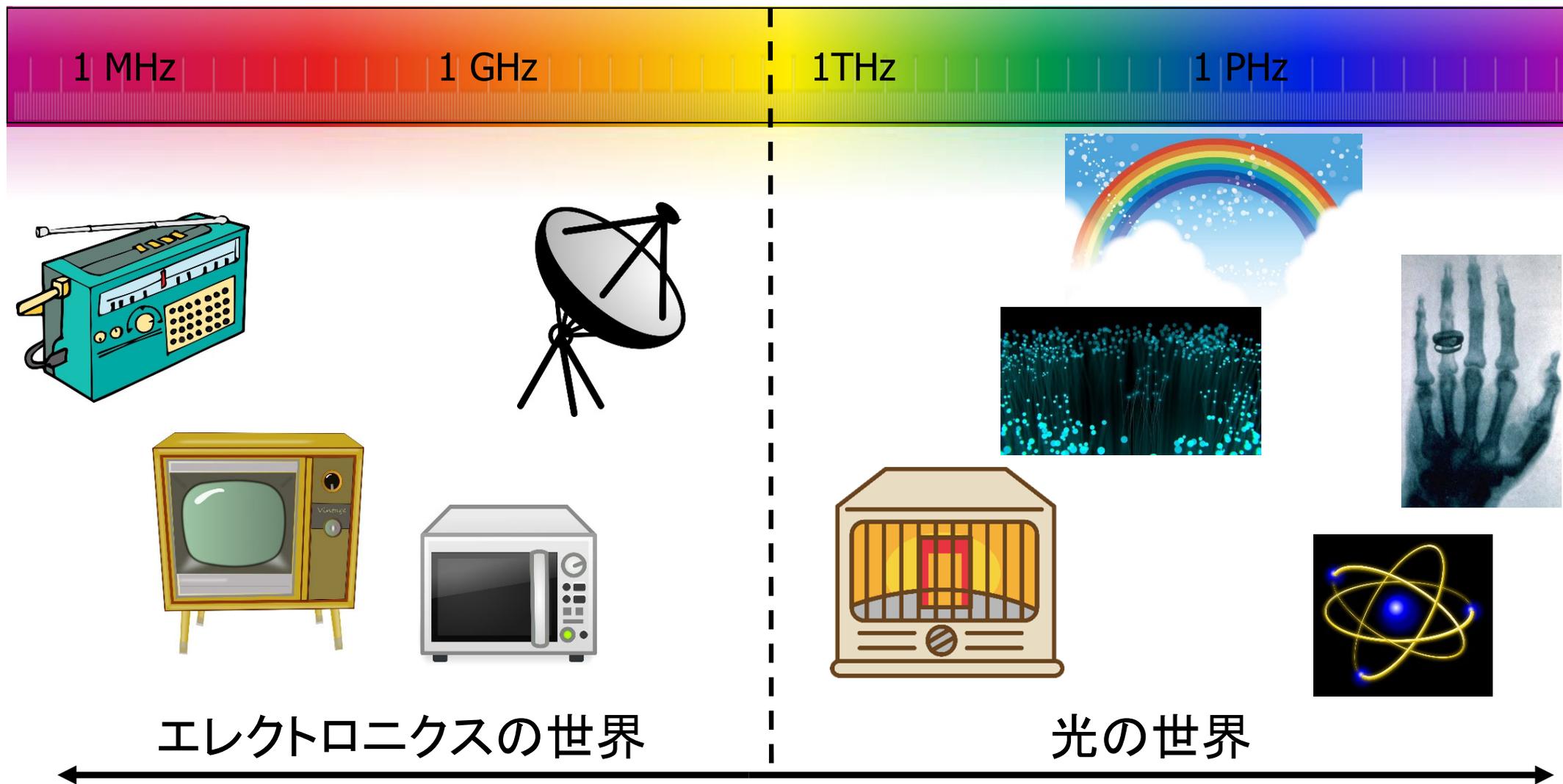
と、ここまでは、ある意味、想定範囲内。

しかし、これでは終わらなかった。

ノーベル賞を超えて、その先へ！

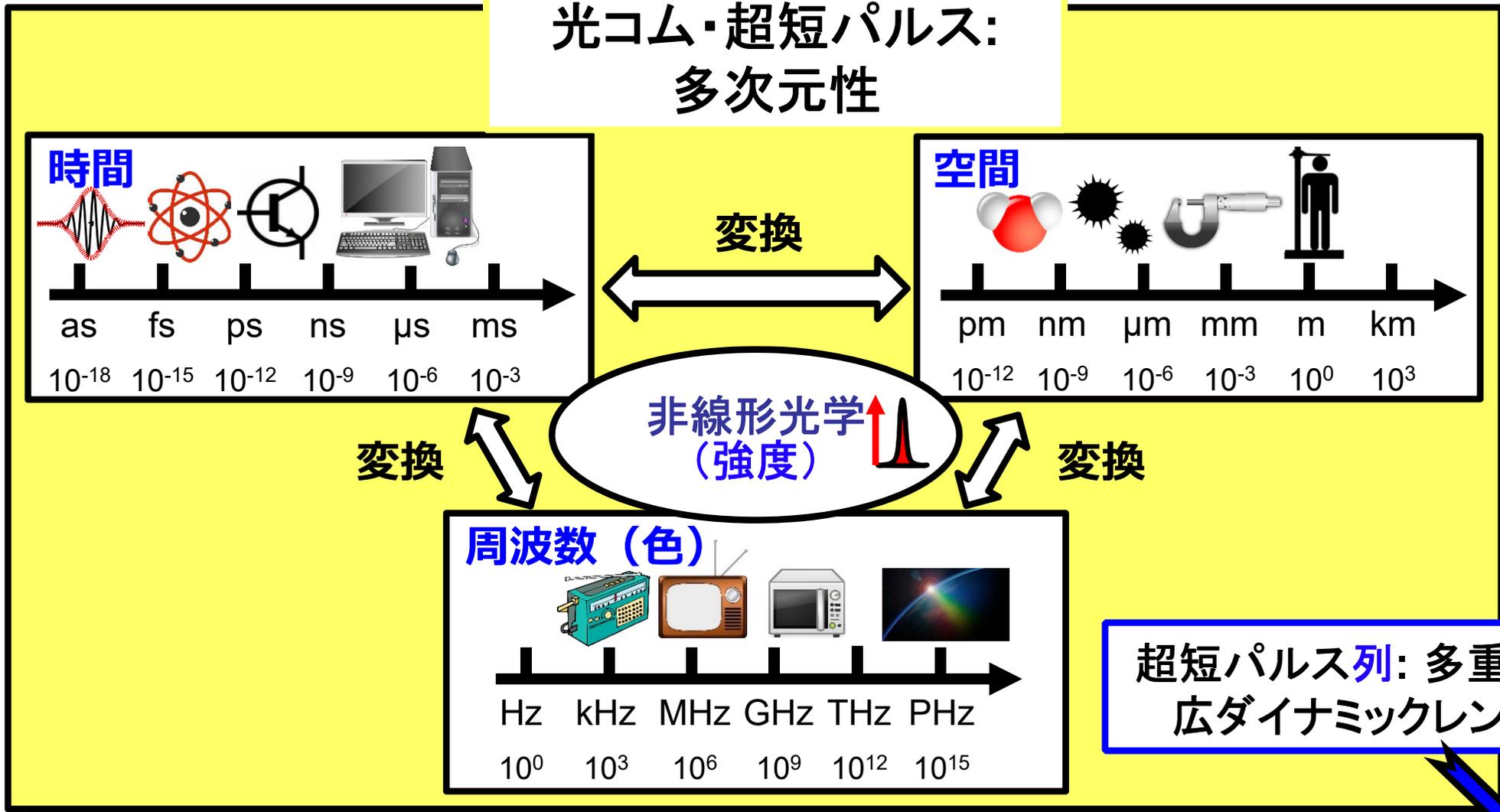
# 光コム ~ 単なる周波数リンクでない

## 電気と光の世界(技術分野)をつなぐもの



# 光コム ~ 単なる周波数ものさしでない

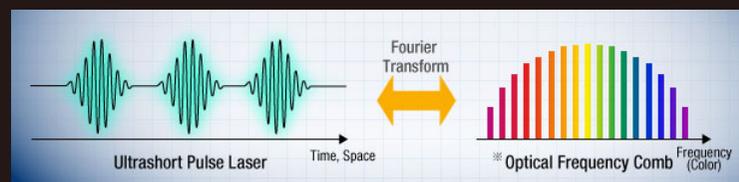
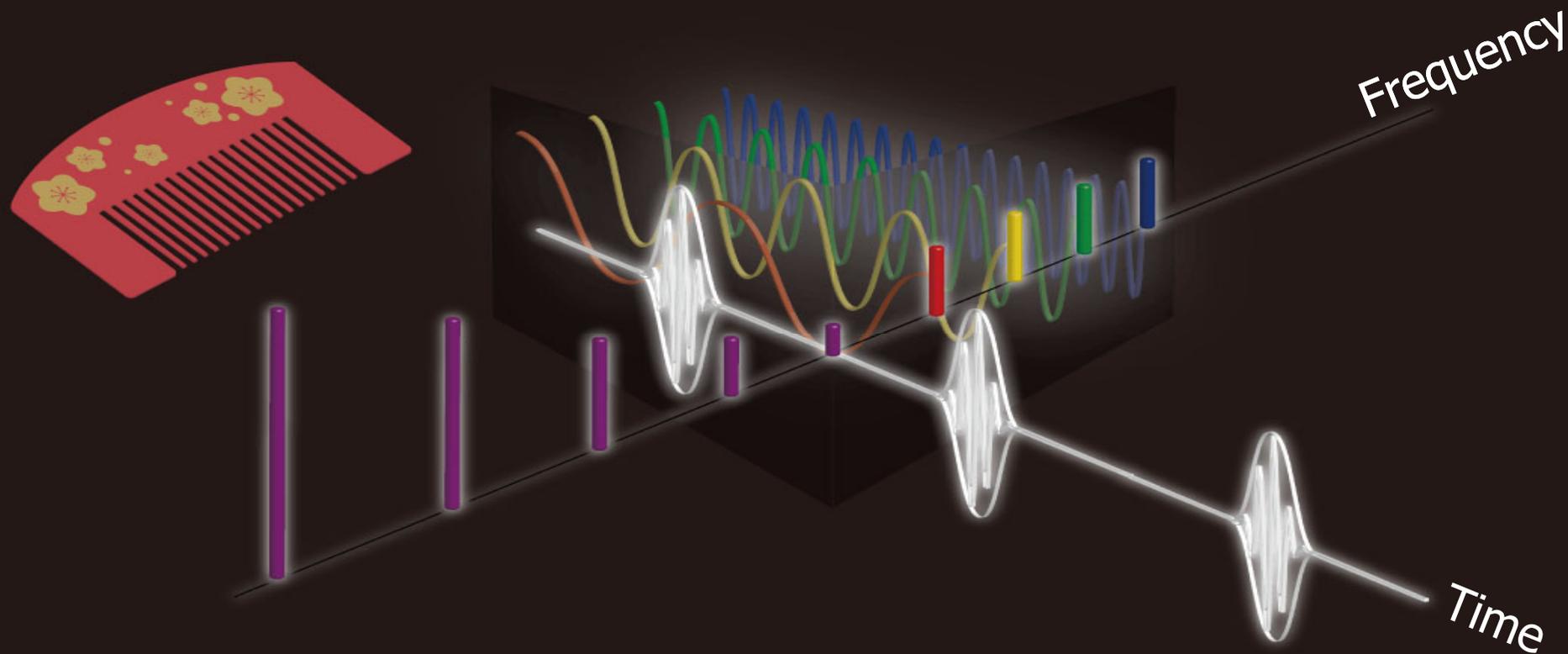
光コム・超短パルス:  
多次元性



超短パルス列: 多重性、  
広ダイナミックレンジ

多次元性・多重性・ダイナミックレンジを利用した多様な応用

# 光コムは、制御された超短パルス列



# 超短パルスレーザーとは？：「時間軸」

一方で、極限の超短パルスレーザー技術が独自に進展していた！

- 一瞬の時間だけ光るレーザー  
(カメラのフラッシュのイメージ)

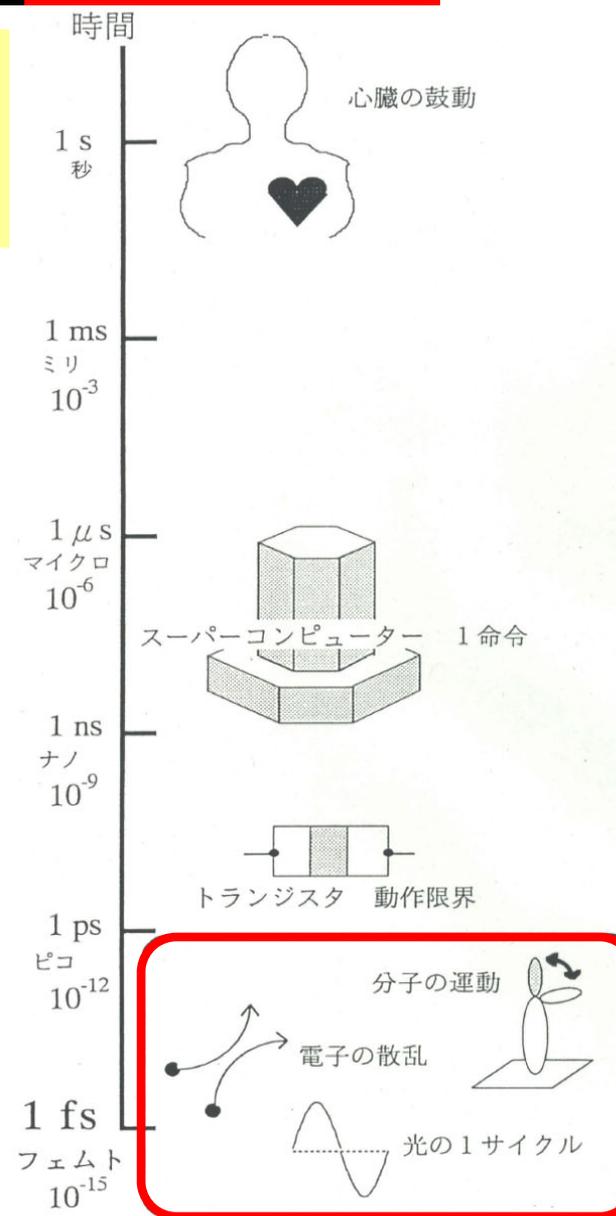
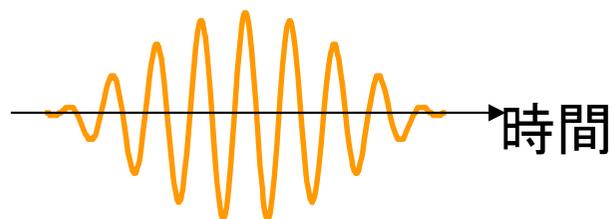
フェムト =  $10^{-15}$

= 千兆分の1

「フェムト秒レーザー」

= 千兆分の1秒程度の時間しか光らない

極限のレーザー



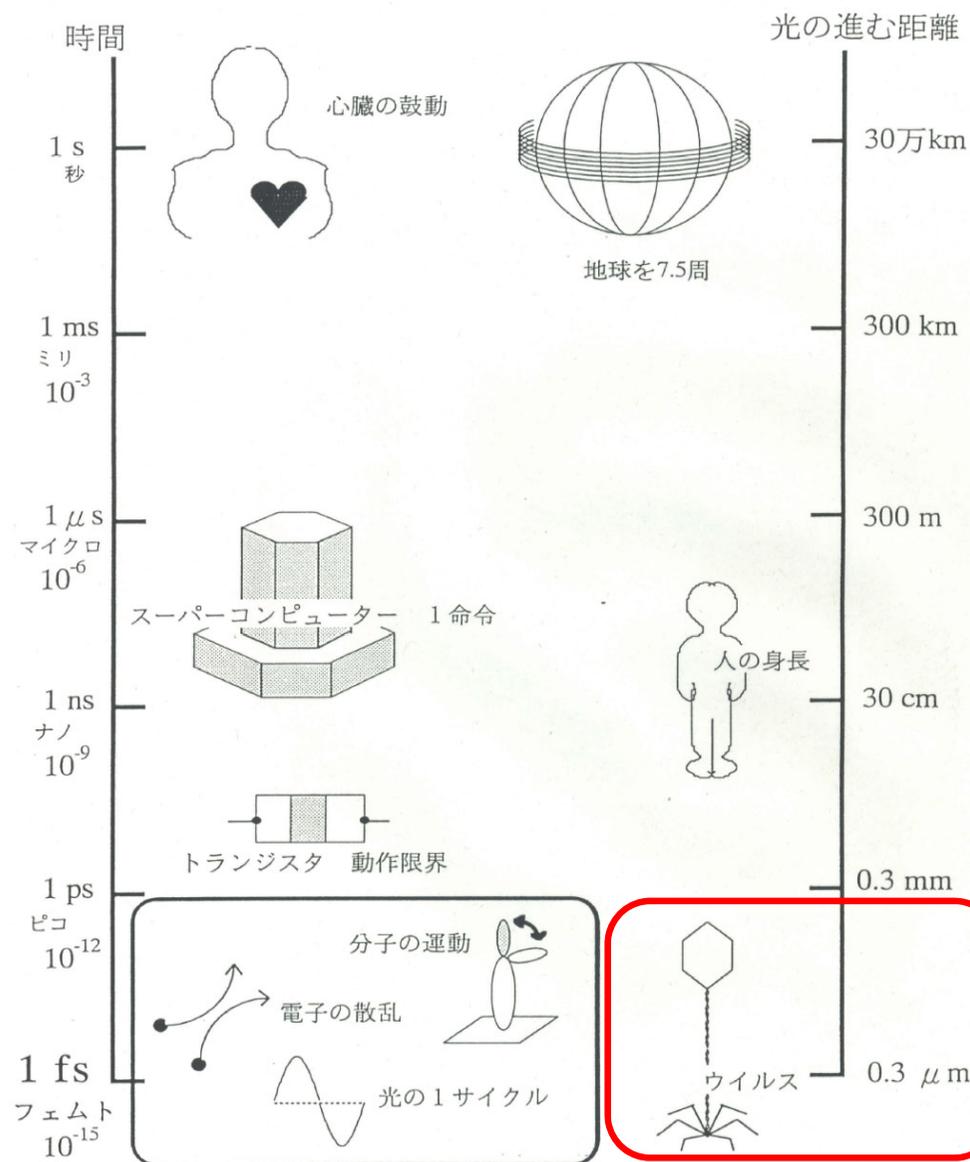
# 超短パルスレーザーとは？：「空間軸」

## 空間的にも局在

- フェムト秒 = 1秒間に地球を7回半周する光でさえ、ウィルスの大きさ程度の距離しか進まない時間

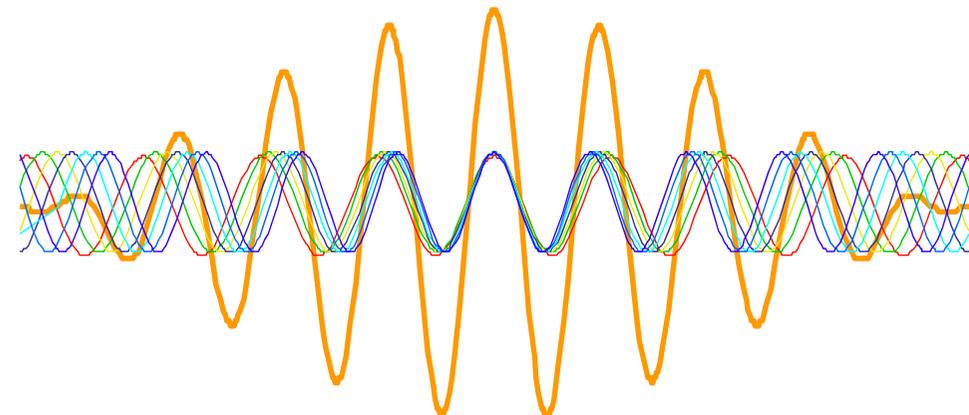
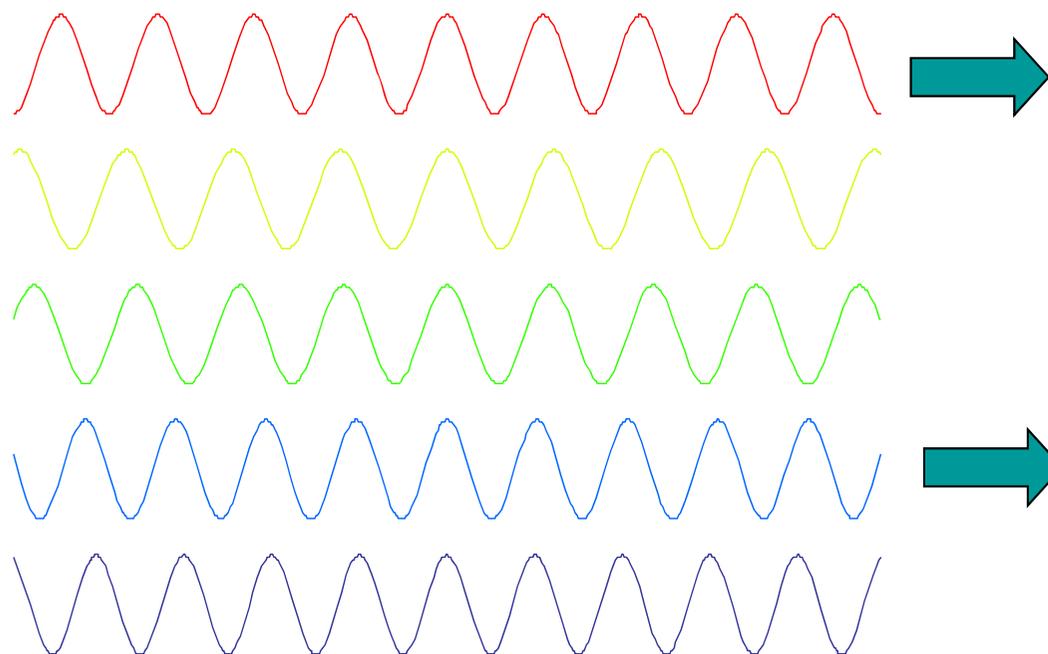
$$1 \text{ fs} = 0.3 \mu\text{m}$$

精密な時間を扱うことは、  
精密な空間を扱うこと



# 超短パルスは波を重ねて作る:「周波数軸」

- 時間と周波数の”フーリエ変換”を利用して発生
- 「たくさんの波」を「そろえて」重ねる
  - たくさんの波 => いろいろな周波数(色)
  - そろえて => 位相を同期



そろえて重ねる

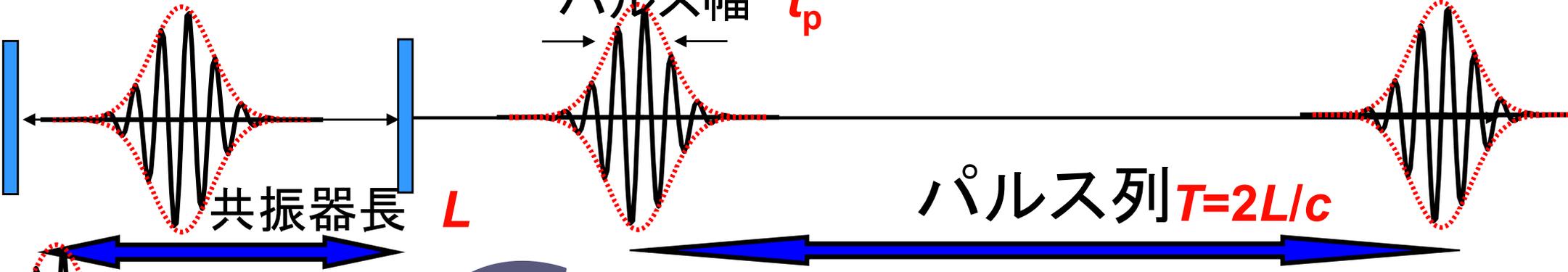


ばらばらに重ねる

ランダムな波。太陽光、電球など

# パルス“列”でコムになる

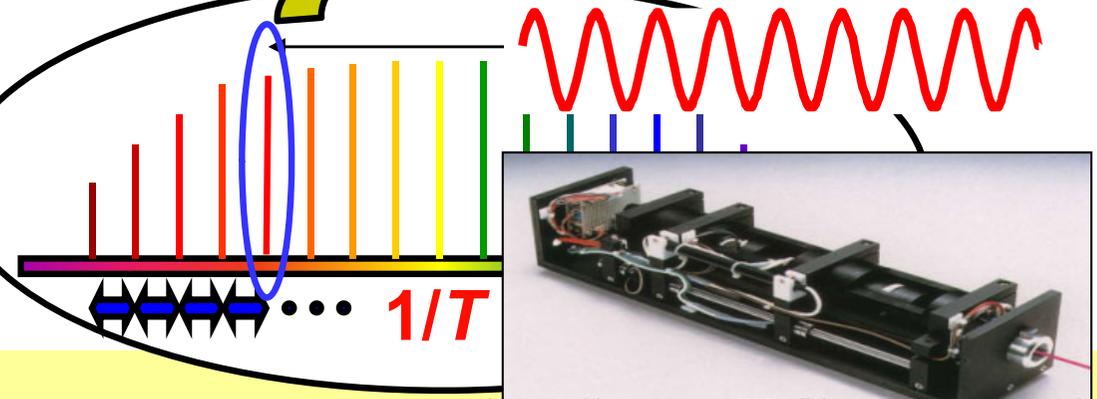
レーザー共振器



フーリエ変換

光の櫛

「光(周波数)コム」



<https://www.nmij.jp/library/units/length/>

実は、1台で、  
超短パルスレーザーと、超精密な連続波レーザーの性質を持っていた！

# “光”によるメートルの定義の実現

メートルの実現方法 (CIPM勧告、1983)

① 時間測定 (パルス法)

② 波長測定 (干渉法)

両方の技術が超精密につながった!

$$\lambda = c / f$$

③ 放射リストの値を使う

Table 8. (unit: MHz; s: estimated standard deviation)

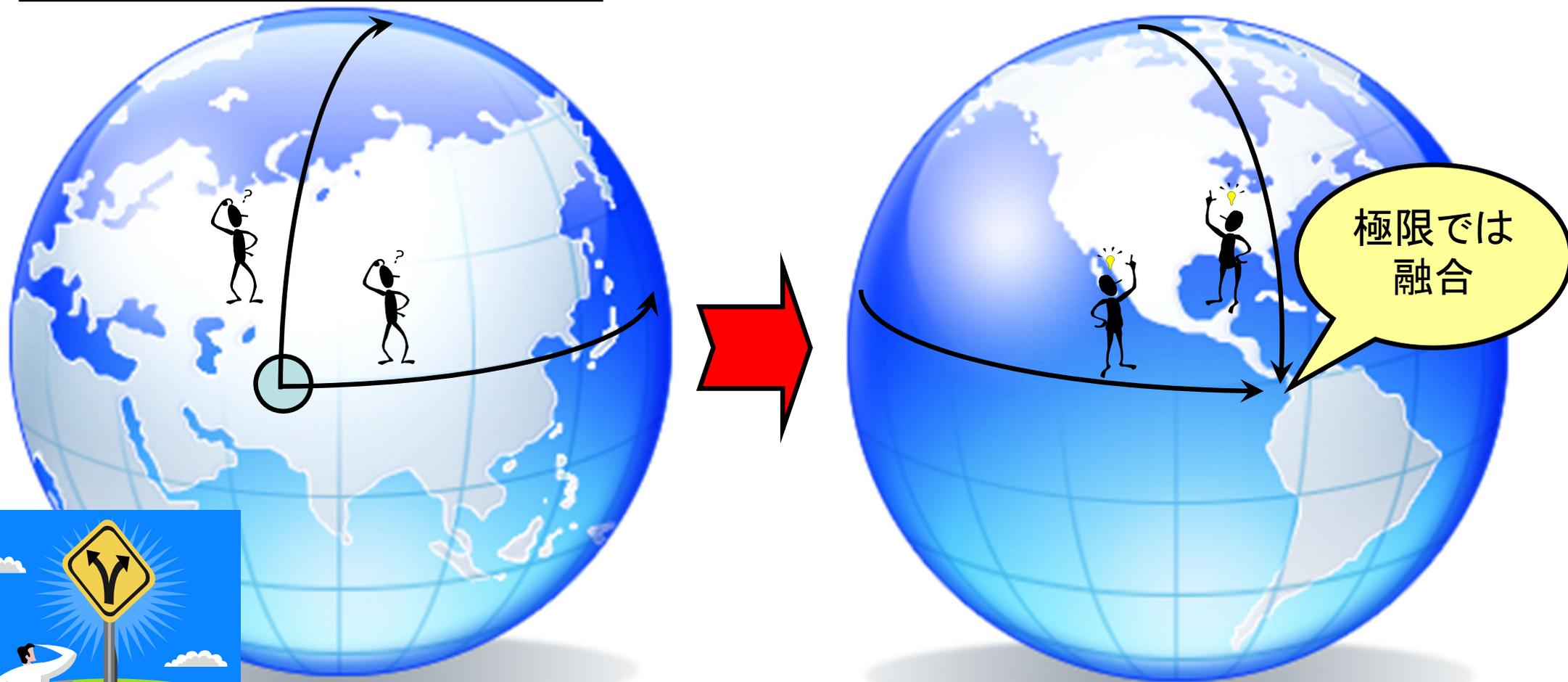
$\lambda = 633 \text{ nm}$ ,  $^{127}\text{I}_2 \text{ R}(127) 11-5$

Reference: component i ( $a_{13}$ ),  $f = 473\,612\,214.8 \text{ MHz}$  [1]

| Component | $f(a_n) - f(i)$ | s        | Component | $f(a_n) - f(i)$ | s |         |       |
|-----------|-----------------|----------|-----------|-----------------|---|---------|-------|
| $a_2$     | t               | -582.9   | 0.5       | $a_{12}$        | j | -21.565 | 0.005 |
| $a_3$     | s               | -558.9   | 0.5       | $a_{13}$        | i | 0       | -     |
| $a_4$     | r               | -320.6   | 0.1       | $a_{14}$        | h | 21.939  | 0.005 |
| $a_5$     | q               | -292.7   | 0.5       | $a_{15}$        | g | 125.694 | 0.005 |
| $a_6$     | p               | -290.3   | 0.5       | $a_{16}$        | f | 138.892 | 0.005 |
| $a_7$     | o               | -263.0   | 0.1       | $a_{17}$        | e | 152.255 | 0.005 |
| $a_8$     | n               | -162.814 | 0.005     | $a_{18}$        | d | 165.116 | 0.005 |
| $a_9$     | m               | -153.801 | 0.005     | $a_{19}$        | c | 283.006 | 0.005 |
| $a_{10}$  | l               | -137.994 | 0.005     | $a_{20}$        | b | 291.100 | 0.005 |
| $a_{11}$  | k               | -129.950 | 0.005     | $a_{21}$        | a | 299.931 | 0.005 |

Metrologia 19, 163-177 (1984)

# 極限分野の融合



直交していた分野が、独立に進歩して行くと、、、

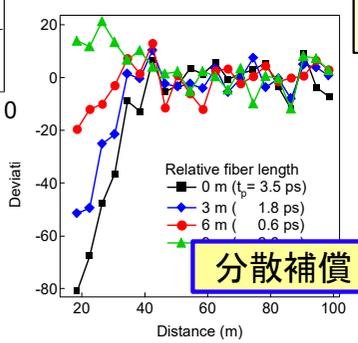
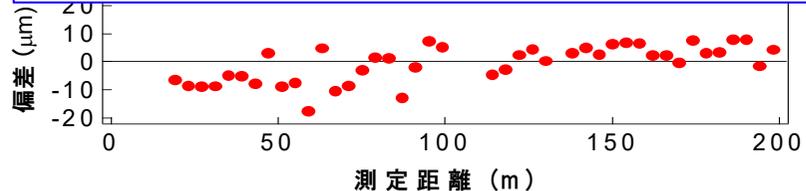
**融合により、新分野が誕生**

## コム距離計

超高分解能 **200 nm** 短距離 ( $f = 40 \text{ GHz}$ );  
1.6  $\mu\text{m}$ ,  $7 \times 10^{-9}$ , 240 m ( $f = 10 \text{ GHz}$ )

世界最高精度の**絶対距離計**  
10 km 先のコピー用紙の厚さがわかるほど!

超高精度: 偏差 < 15  $\mu\text{m}$ 、傾き < 0.2 ppm, 200 m



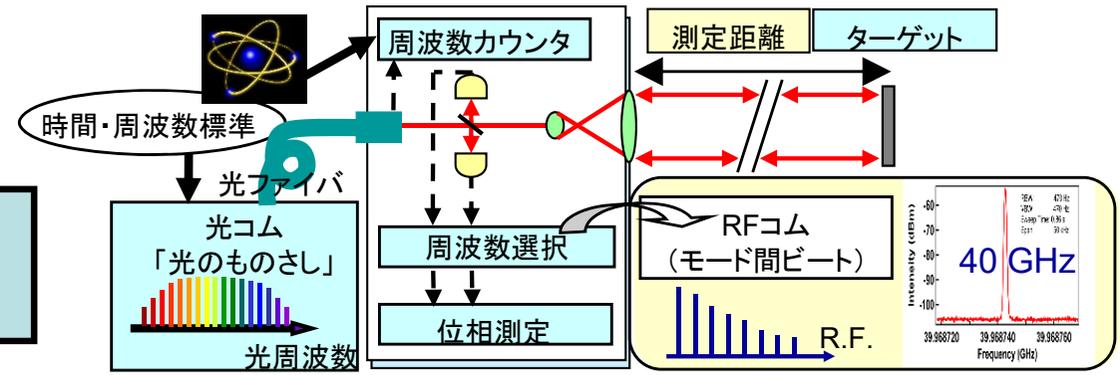
分散補償

高精度ファイバ伝送  
(256 m)



長距離タイプ

屋外でも高精度測定  
超高分解能(空気揺らぎ限界):  
 $\sigma = 14 \mu\text{m} (@280 \text{ m}) \sim 5 \times 10^{-8}$



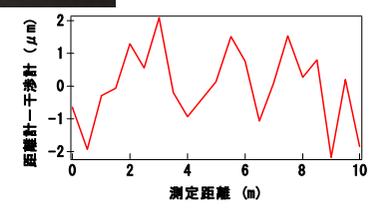
高精度・高次高調波モード間ビートの位相測定  
 $f = 50 \text{ MHz}, 10 \text{ GHz}, 40 \text{ GHz}$  (821<sup>st</sup> 高調波)



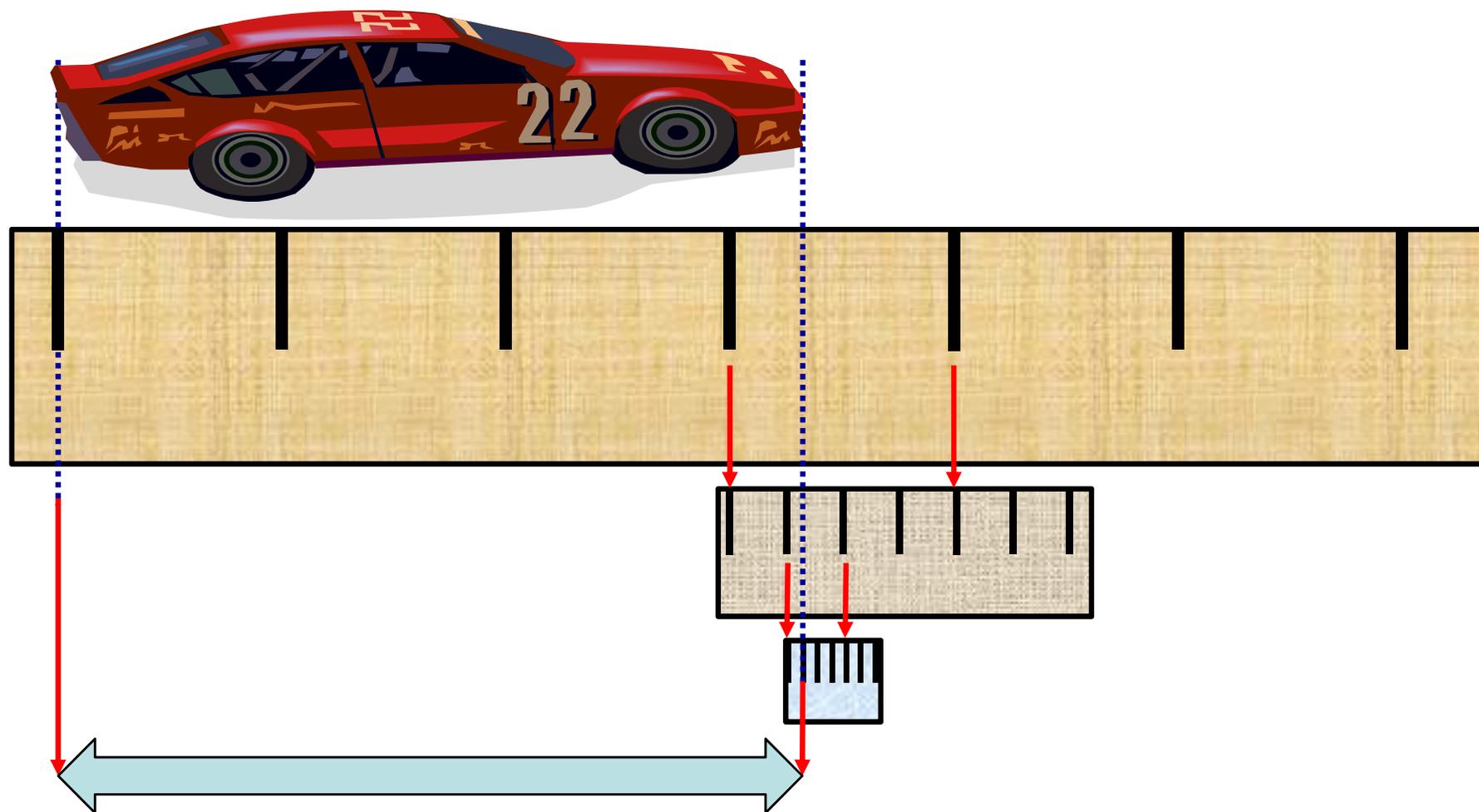
短距離タイプ

組み込み可能

現在の性能は、  
空気揺らぎが制限している



# 絶対測定：多数の目盛りをつなぐ「コヒーレントリンク」



光コムで、多数の精密な目盛りを作る

# 距離の高精度絶対計測

・超長距離絶対計測

・絶対距離・位置センシング

産業計測

宇宙科学・技術

(from ESA report  
by R. Holzwarth, .., T. Hänsch, 2008)



単に、“超長距離”を測るだけでない。  
様々な場面で、絶対計測が必要！

- ・ 距離・位置センシング、製造モニタ・検査
- ・ 外乱によるビーム遮断の影響排除
- ・ 長期モニタ(地殻変動、建造物劣化)
- ・ 半導体デバイスの作成(微小長さも高精度に)



J. Lee, et al., Sci. Rep.,  
4:5134: p. 1-7 (2014)

- ・ 究極の超長距離の“超精密”測定  
< pm/km

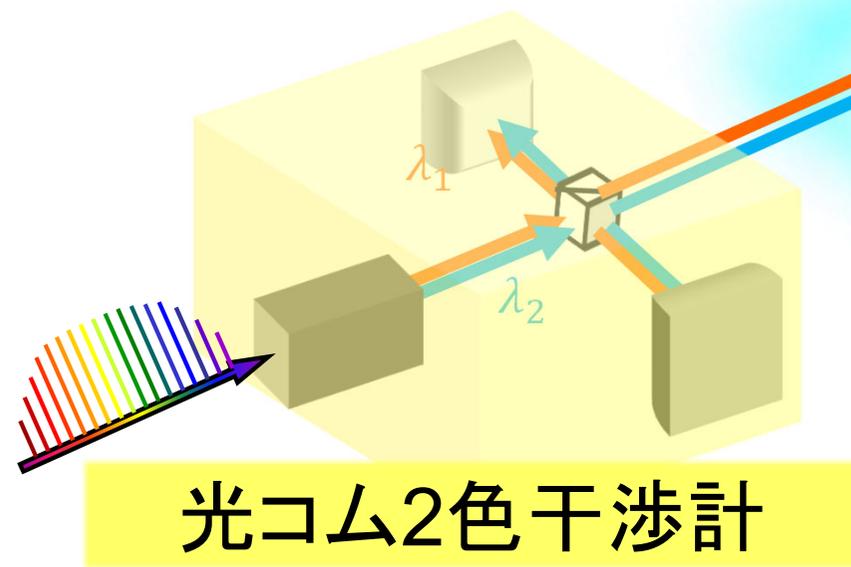
単に精密なだけでない。  
“精度の余裕”が“機能”を生む

K. Minoshima et al., Opt Exp (2011);  
G. Wu, ..., K. Minoshima, Sci. Rep. (2013)

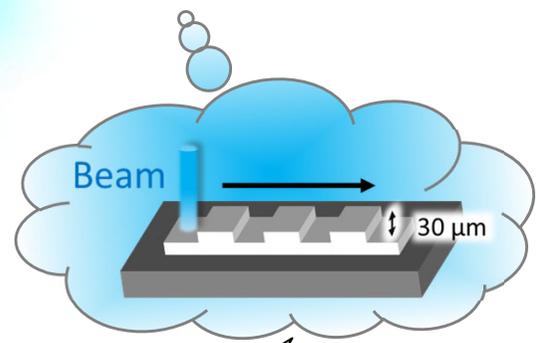
# 「環境自己補正型」干渉測定:

光が環境を自己申告

➡ 光自身を作り変えて変動をなかったことに!



光路長 60 m

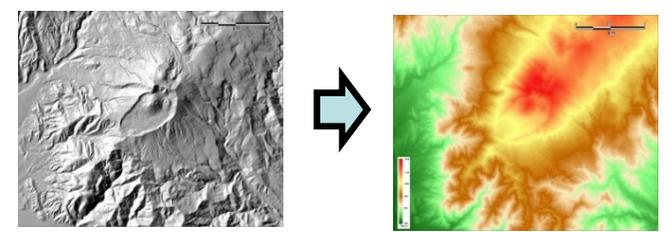


~ナノメートル  
精度

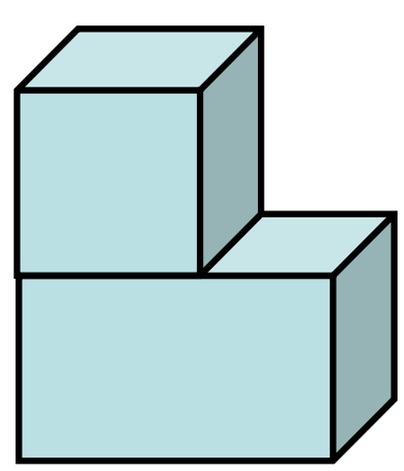
“精度の余裕”が“機能”を生む

# 光が作る色分け3次元地図

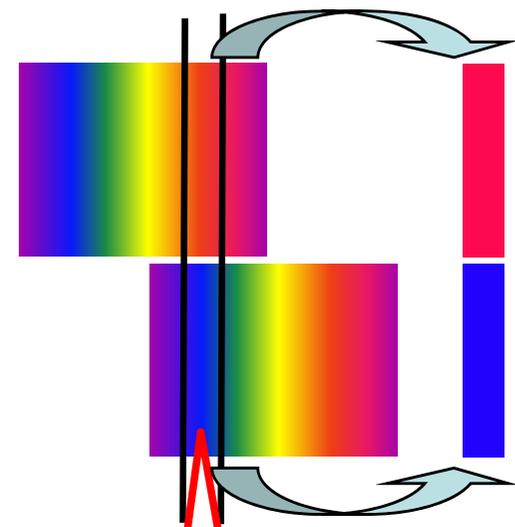
チャープしたフェムト秒パルス  
(多色が規則的に並ぶ”時間の虹”)



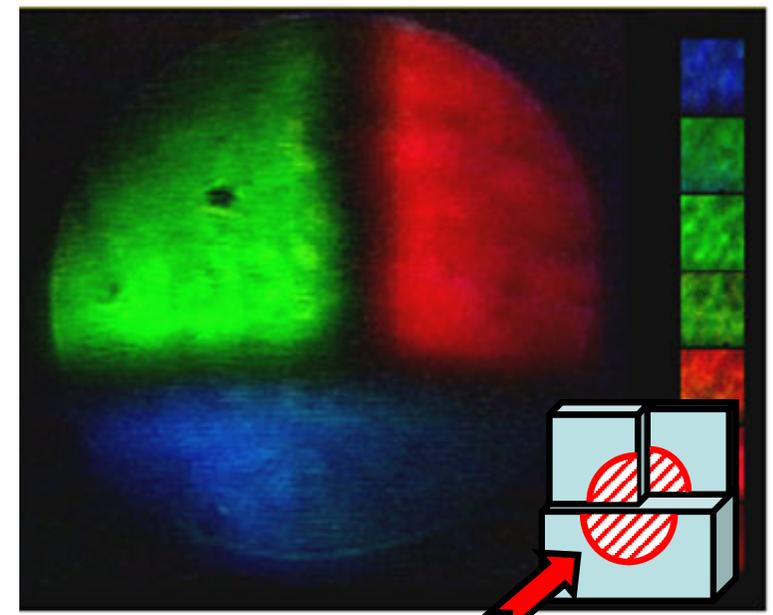
<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/volcano/rrim/rrim.html>



測定対象



超高速シャッターによる切り出し  
(光のナイフ)

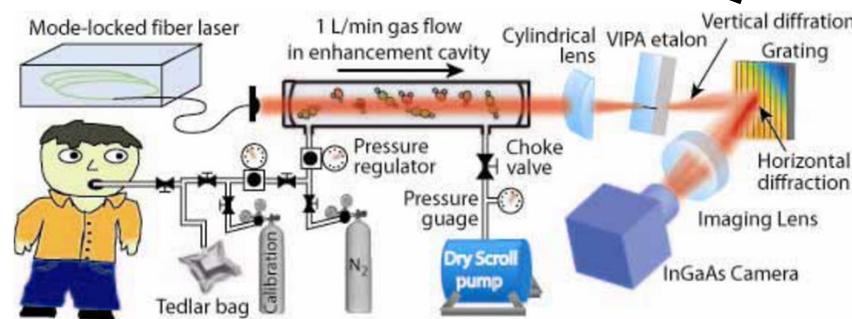
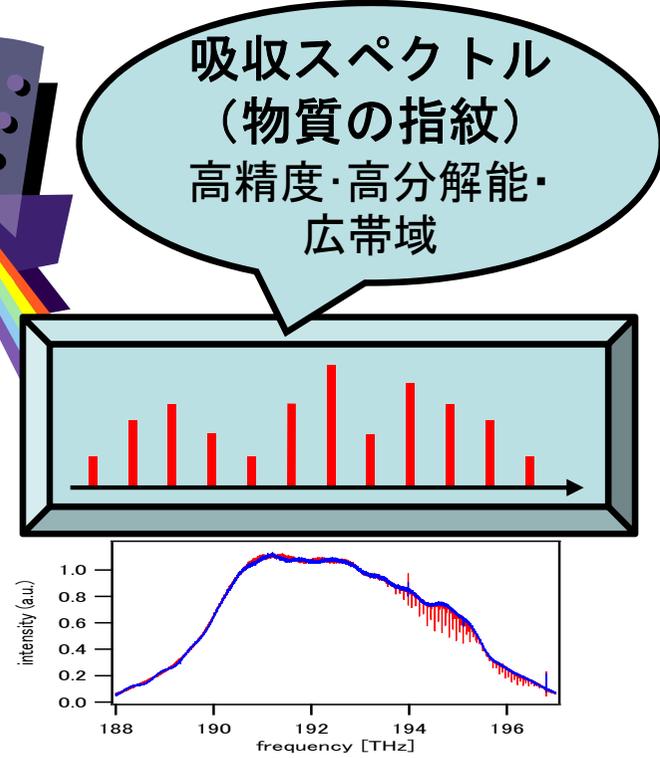
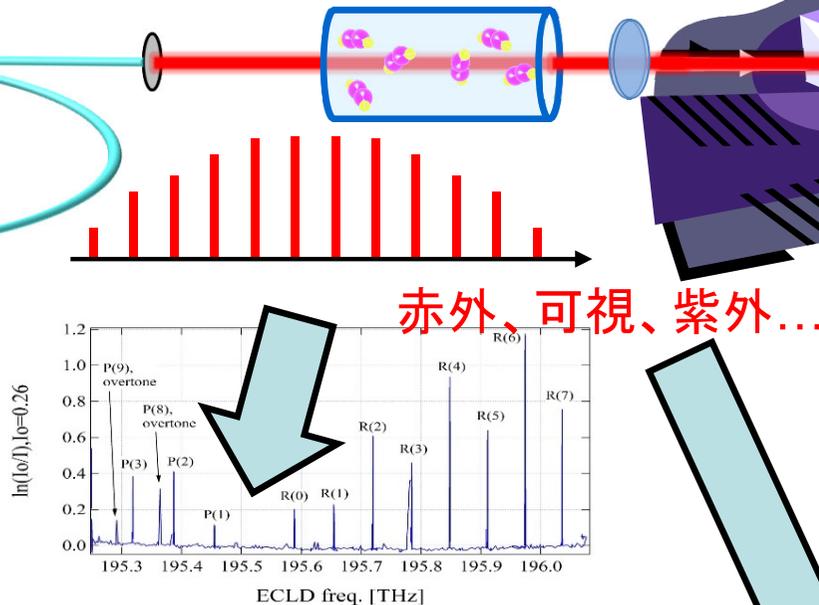
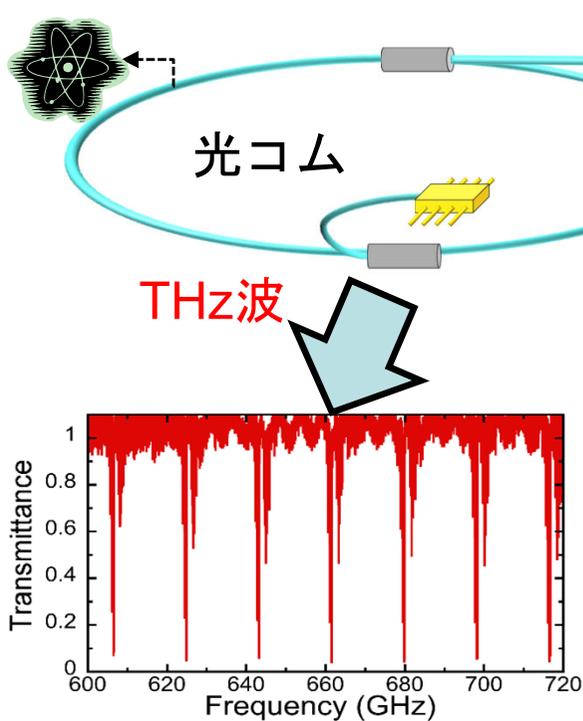


段差形状が光の色に  
光が作る色分け地図

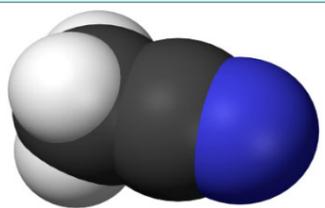
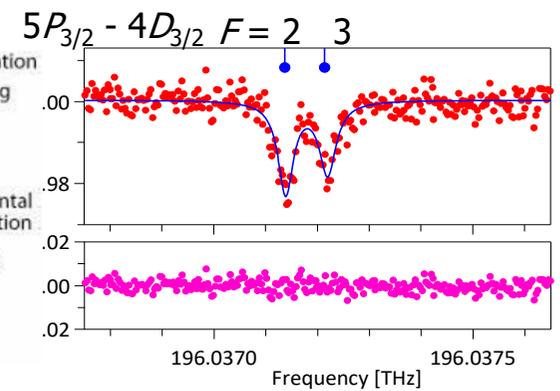
空間 ⇒ 時間 ⇒ 色 (フェムト秒パルスを介して変換)

T. Kato, M. Uchida, K. Minoshima, Sci. Rep. (2017); 美濃島, 特願(2016);  
K. Minoshima, et al., J.J.A.P. 33,1348 (1994); 美濃島, 特許(1994)

# 高精度分光・分析



M.J. Thorpe et al., Opt. Exp., Vol. 16, p.2387 (2008)



環境・燃焼計測

分光データベース、通信波長基準、呼気診断

従来の材料評価技術  
(都度構成が必要)

## デバイス・材料の超高速 & 超精密測定

- 分光光度計
- フーリエ変換赤外分光光度計 (FTIR)
- 分光屈折率測定装置
- 分光エリプソメータ
- 厚さ測定装置
- 顕微レーザーラマン分光測定装置

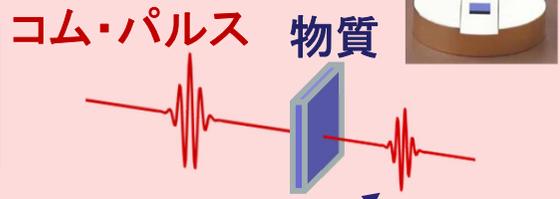
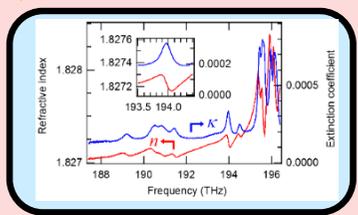
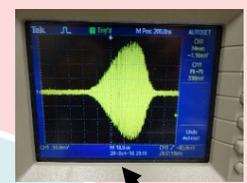
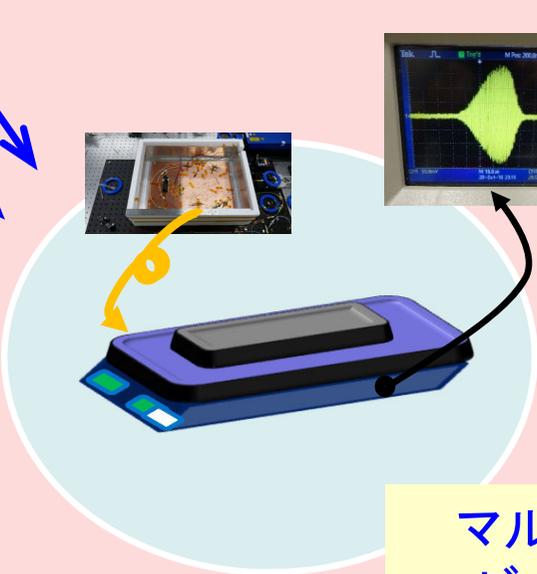
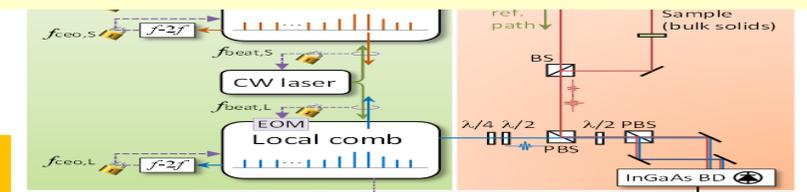
一体化、相関、対象拡大、操作性向上、時間短縮、超小型化

### 機能集積化光源



### 光コム分光技術

(材料、デバイス、非線形、応答、分布...)



“光ネットワークアナライザ”:  
光電場波形の直接取得。モデル不要

マルチモーダル、相関、  
ユビキタス、オンデマンド、  
”物質材料の“血液検査”

# アストロコム

## 天文学

- 系外惑星の探索
- 宇宙の加速膨張の観測、「ダークエネルギー」
- 光コムによる高精度な分光器の校正
- 微小な速度変化の検出

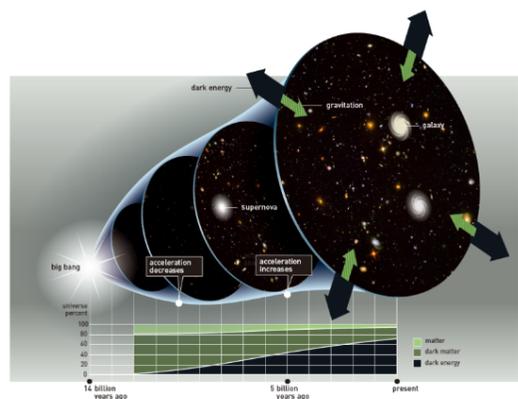
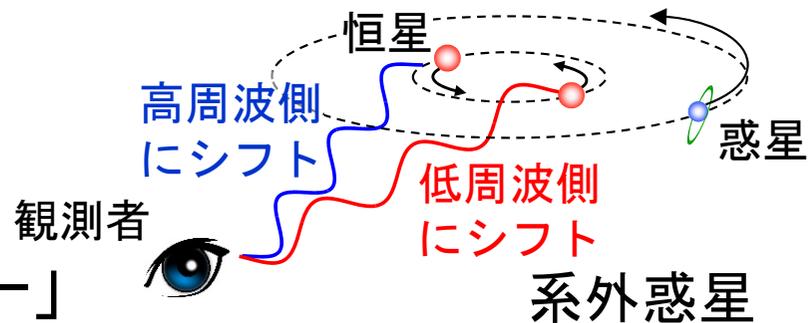
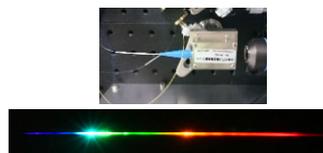


Figure 1 from  
[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2011/popular-physicsprize2011.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/popular-physicsprize2011.pdf)

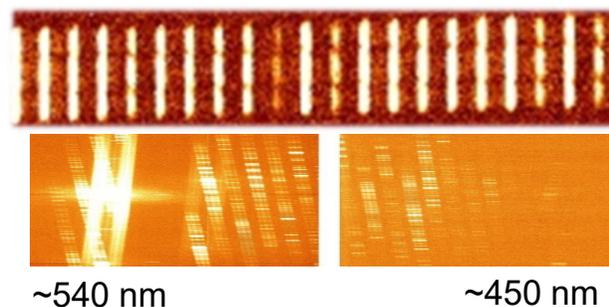
“Accelerating expansion of universe”,  
Nobel prize in 2011



\*K. Iwakuni *et al.*, Opt. Lett.  
41 3980 (2016)



国立天文台岡山  
(188 cm)



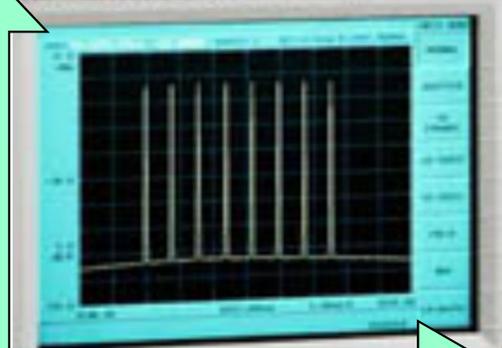
Our Project

# 実は、光を自由自在に操作するツールだった 単なる“ものさし”ではない ～究極の夢～

## 光の世界 (光シンセサイザ)

光コムのスペクトル(イメージ)

縦軸  
|| 光強度



横軸 = 光の周波数(波長)



光コム

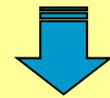
コム(櫛): 光周波数(波長)の規則的な並び

振幅・周波数・位相

コヒーレンス

道具

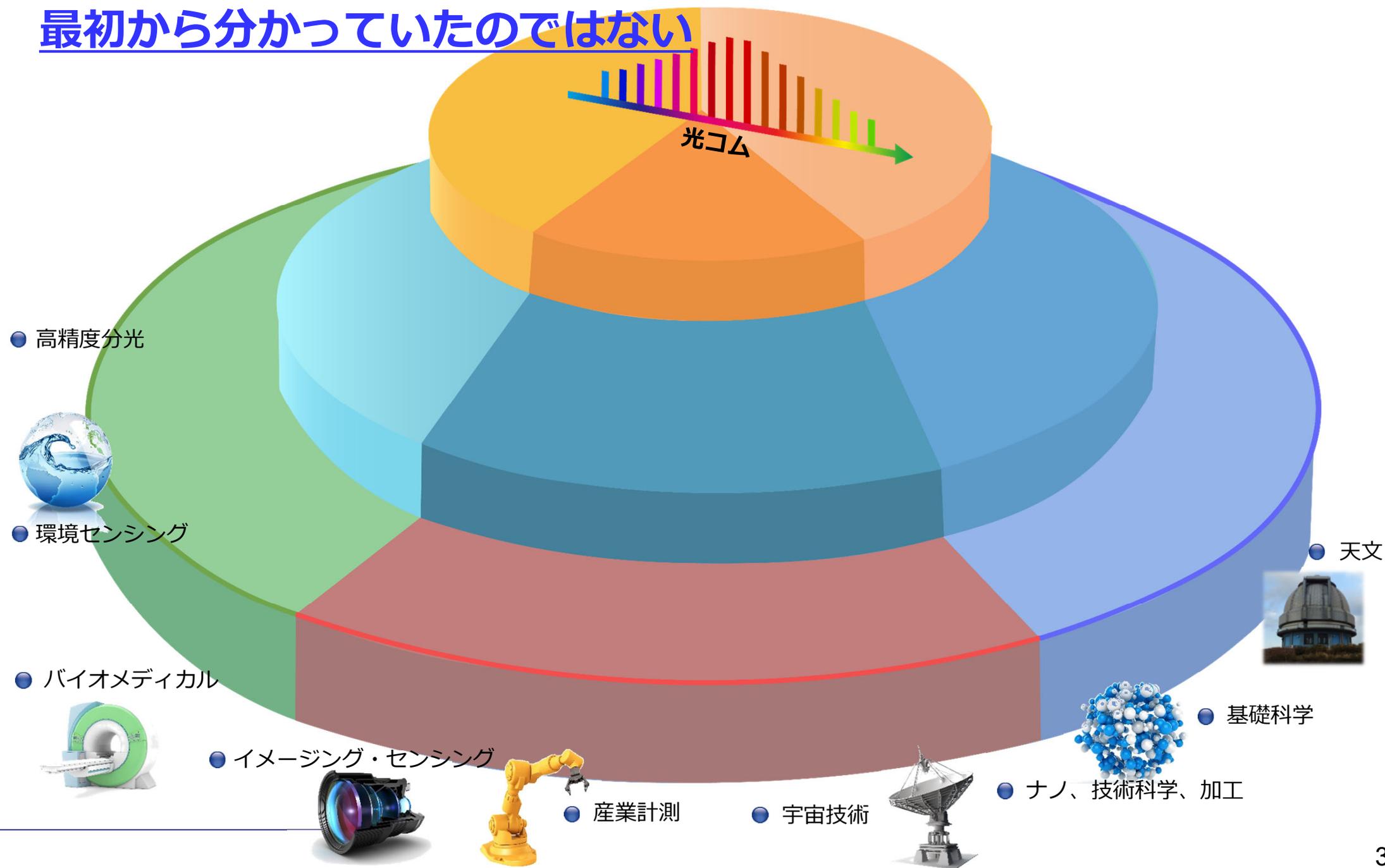
## 音の世界 (シンセサイザ)



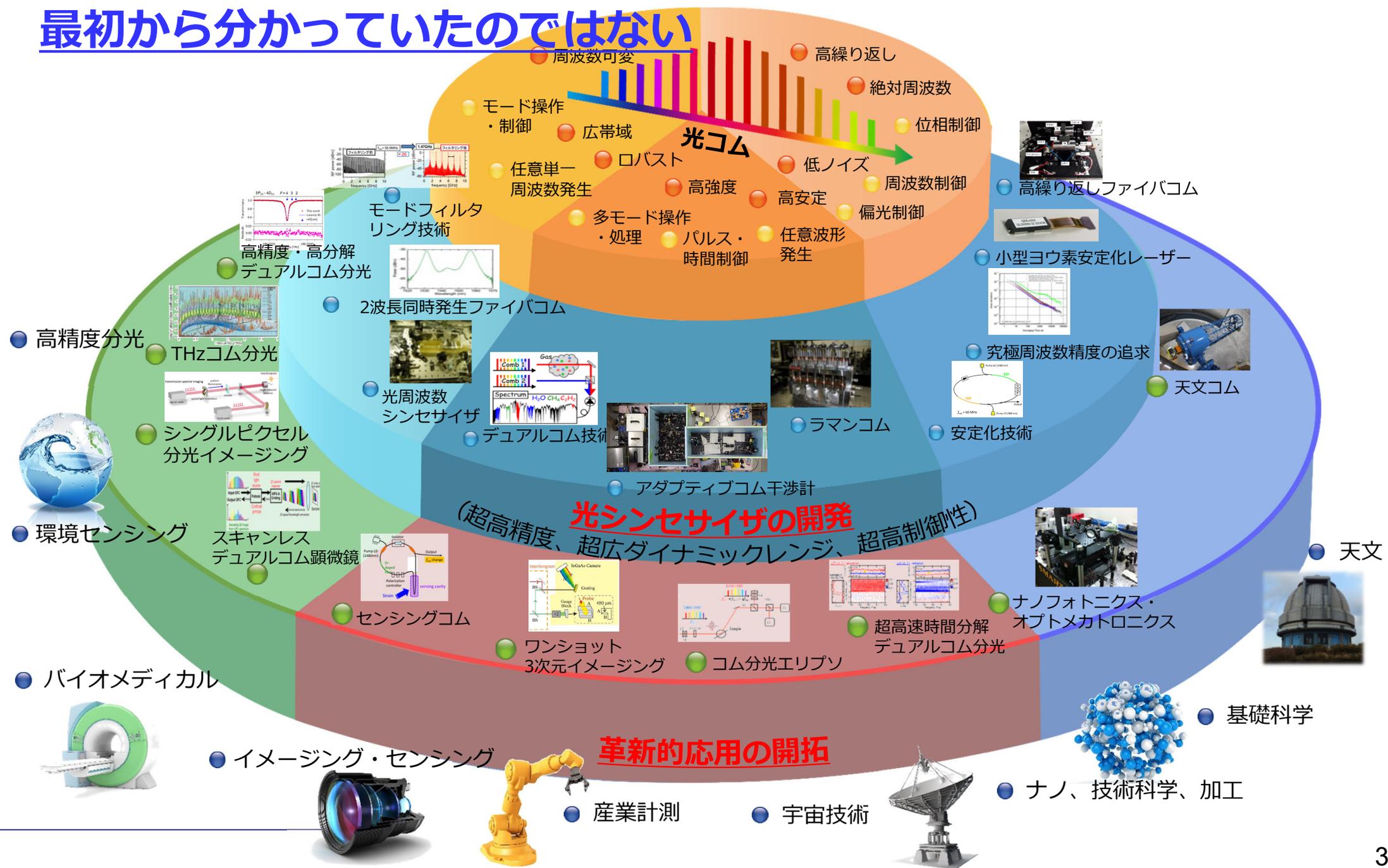
強さ・音程・リズムの制御  
自由自在に音楽を奏でる

『光の楽器』ができていた!

# 光の楽器「光シンセサイザ」の開拓する世界： 最初から分かっていたのではない



# 光の楽器「光シンセサイザ」の開拓する世界： 最初から分かっていたのではない



# 「光シンセサイザ」の拓く世界はますます広がっていく

環境計測



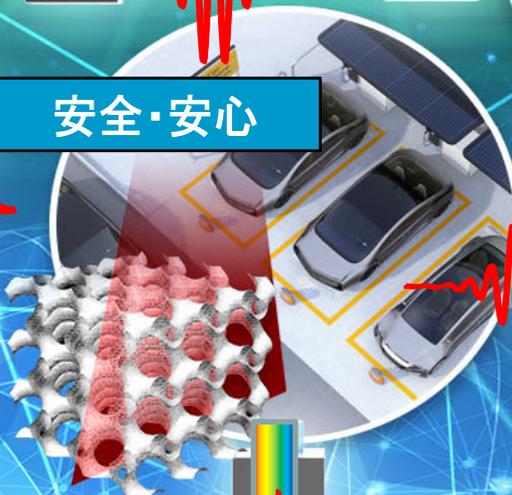
製品検査



リモート診療



安全・安心



生育モニター



光シンセサイザ

光コム



# 今は、定義が変わっただけに見える

私たちの暮らしは変わらないことが強調されている

でも、それは、今のこと

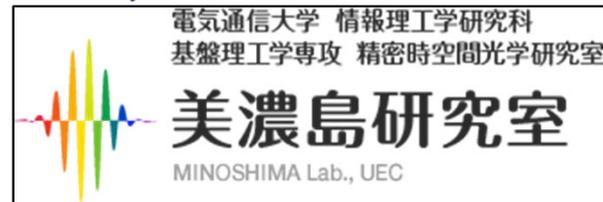
将来の科学技術の進展へ、道が開かれた！

# 今は、定義が変わっただけに見える

私たちの暮らしは変わらないことが強調されている

私たちの暮らしの未来へ、  
可能性が大きく開かれた！

技術の進展へ、道が開かれた！



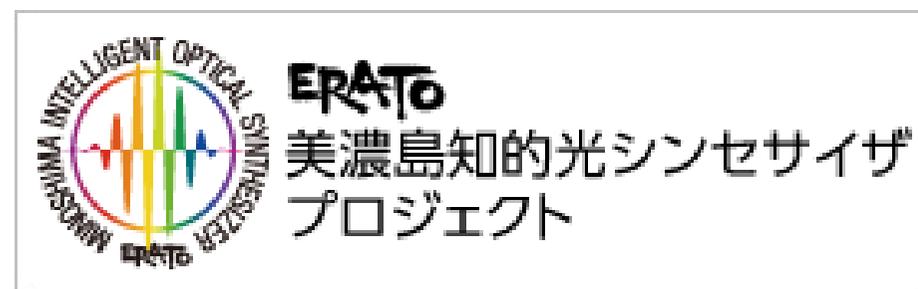
## 主な共同研究者・協力者 (敬称略、順不同)

- 電通大 美濃島研(研究員)中嶋善晶、浅原彰文、加藤峰士、徐博、西山明子  
(卒業生)宮野皓貴、安井英顕、吉田悟、近藤健一、牧野智大  
(大学院生)内田めぐみ、王月、田中優理奈、梁木琢也、秦祐也、生澤佳久、石井貴大  
(共同研究者)桂川真幸、庄司暁、中川賢一
- 産業技術総合研究所 稲場肇、大苗敦、大久保章、保坂一元、中村圭佑
- 徳島大学 安井武史、南川丈夫
- 横浜国立大学 洪鋒雷
- 慶応大 佐々田博之
- 国立天文台 泉浦秀行、神戸栄治、筒井寛典
- 住友電気工業(株) 長谷川健美、山本義典
- アメリカ コロラド大 Thomas Schibli
- 中国 清華大学 Guanhao Wu
- 中国 北京大学 Zhigang Zhang
- 中国 北京航空航天大学 Zheng Zheng



## プロジェクト

- JST ERATO「美濃島知的光シンセサイザ」





# “Metrology, the Mother of Science\*”

計測は科学の母

\* J. Hall, Nobel Lecture (2005)