

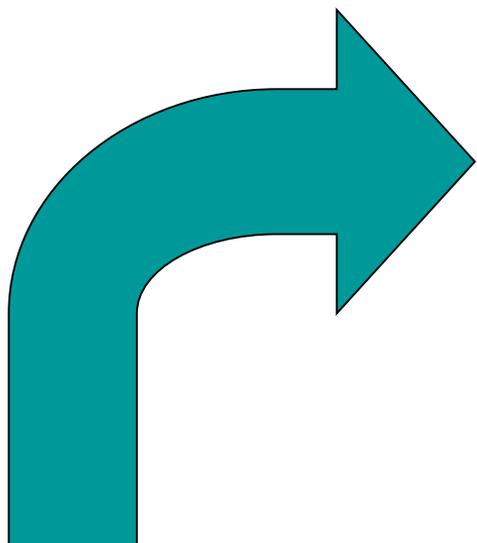
# 光を自由自在に操作する

## ~知的光シンセサイザと革新的応用~

電気通信大学 基盤理工学専攻  
JST, ERATO知的光シンセサイザ  
○研究総括 美濃島 薫

# 「知的光シンセサイザの研究」

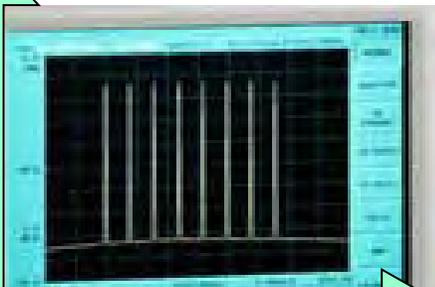
光を自由自在に操作したい ～究極の夢～



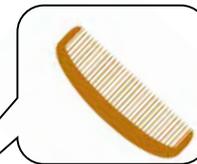
## 光の世界 (光シンセサイザ)

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(楕): 光周波数(波長)の規則的な並び



振幅・周波数・位相・時間・波形・偏光等の制御

自由自在に光を操る道具

## 音の世界 (シンセサイザ)



ピアノ

鍵盤: 音の高さの規則的な並び



強さ・音程・リズムの制御  
自由自在に音楽を奏でる

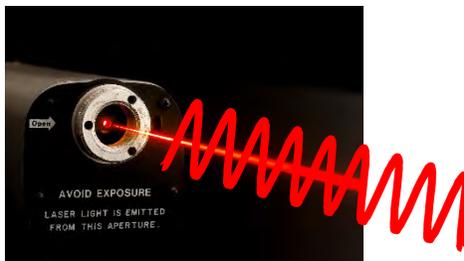
「光コム」は、「光の楽器」!

# 絶対光周波数計測

- レーザーの周波数は、非常に高周波
- 秒の定義(周波数標準)はマイクロ波
- 「光のものさし」が必要

Absolute frequency 473.755480000000 THz

Frequency standards   
9.192631770 GHz



# 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

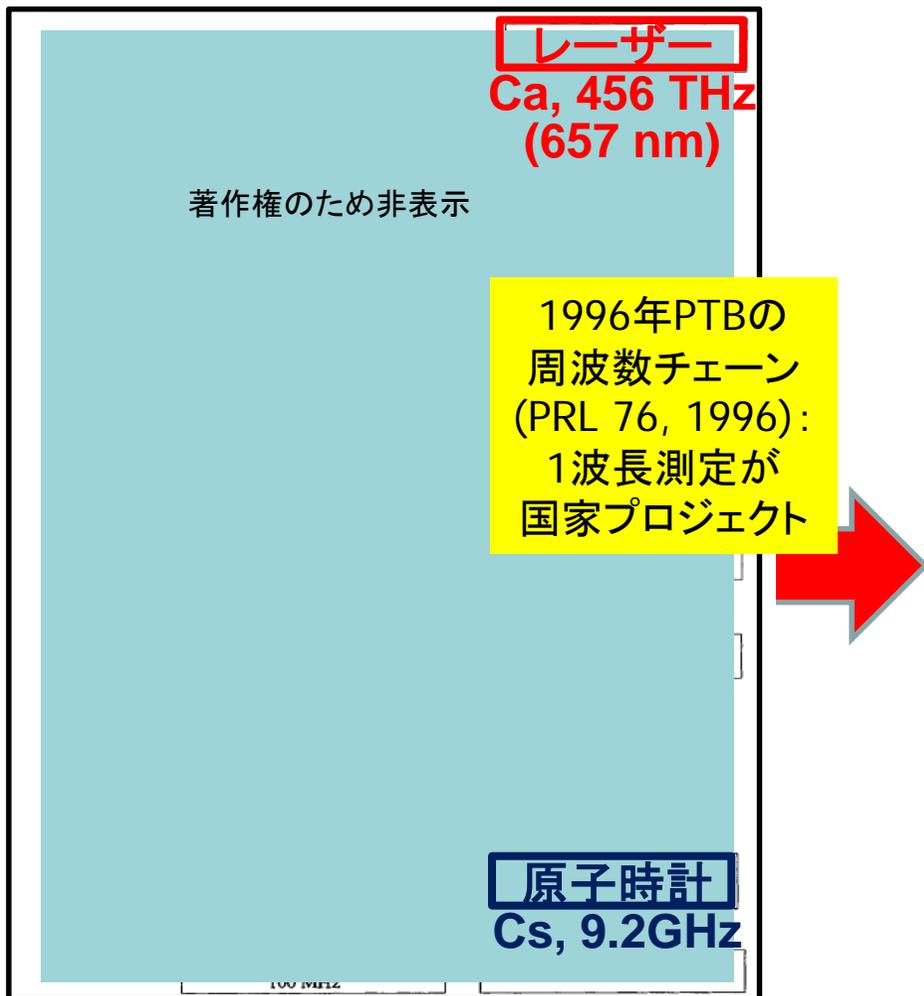


- 長くて正確な、周波数絶対値の付与された光の物差し

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

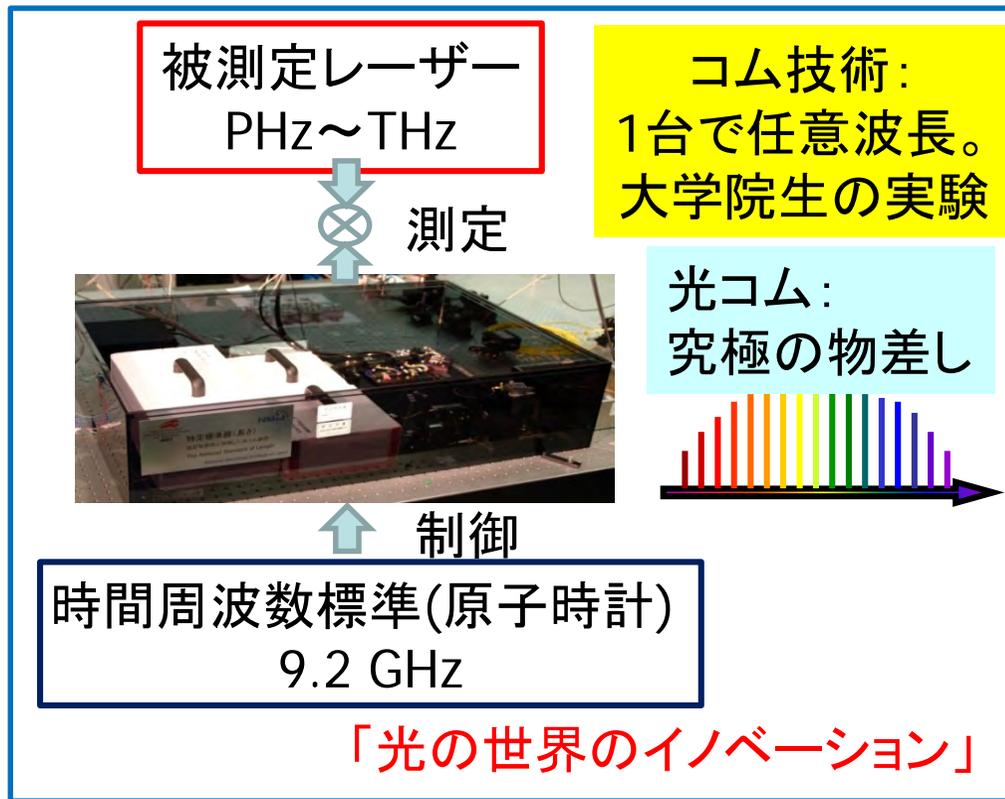
# 絶対光周波数計測

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”



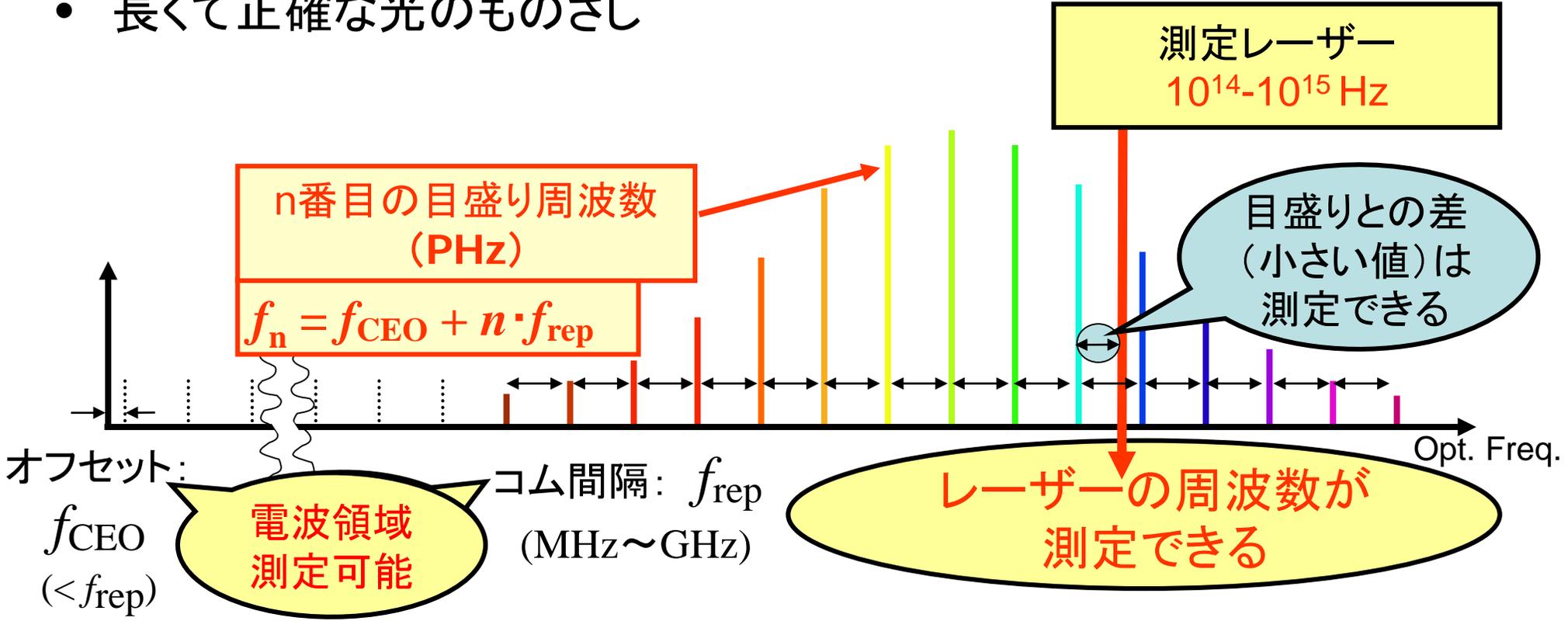
- 簡単、正確、広範囲

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**

2005年ノーベル物理学賞 T.W. Hänsch (独), J.L. Hall (米)

# 「秒」と「メートル」が繋がった

電波の領域

統一の実現へ！

光波の領域

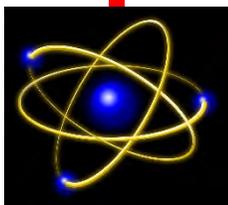
9 192 631 770 Hz

1 GHz

1 THz

1 PHz

最も精密に  
定義されている



原子時計



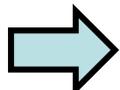
様々な分野で  
応用されている

レーザー



時間(周波数)標準

長さ(波長)標準



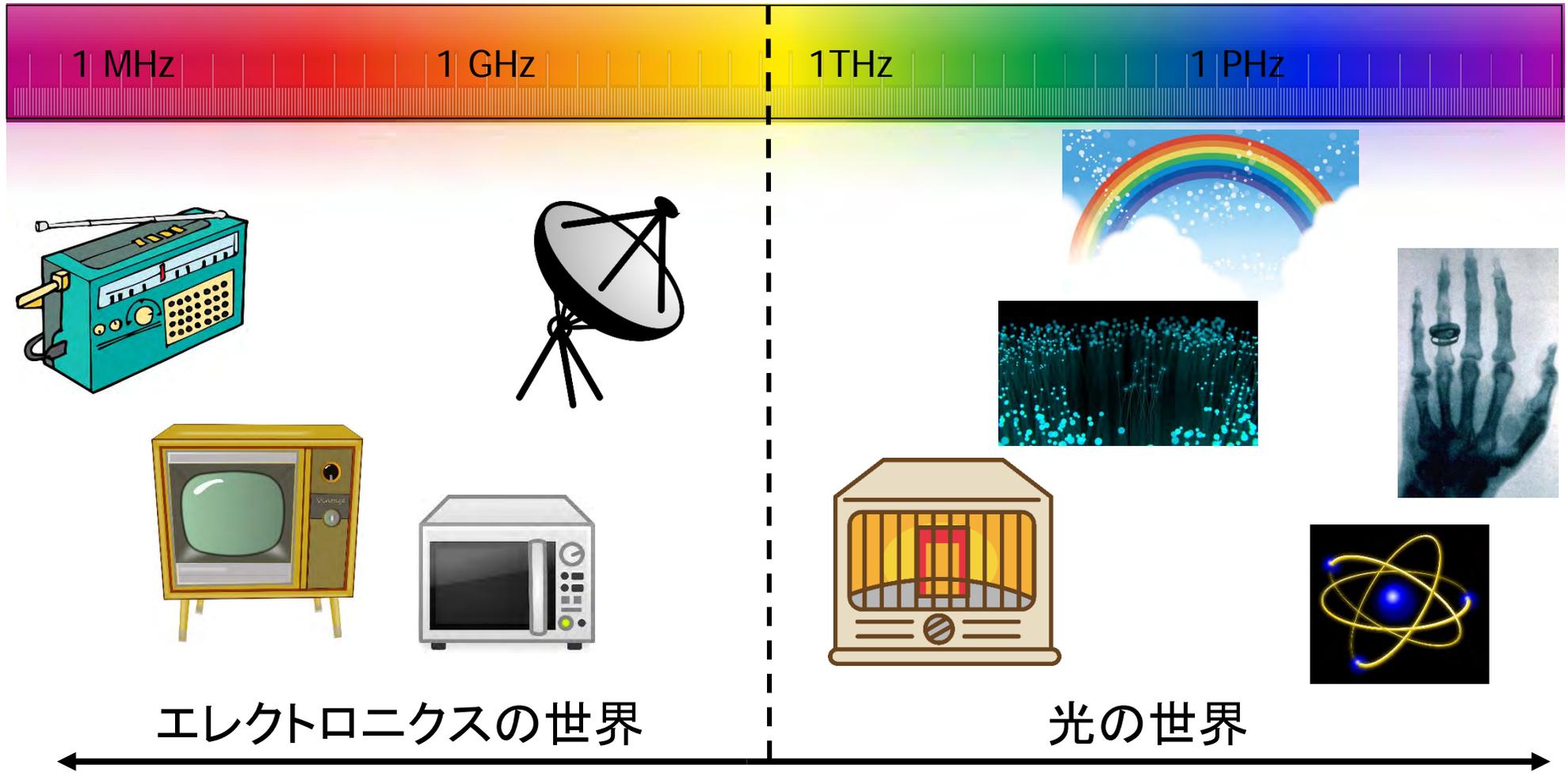
広範な周波数帯をコヒーレントにリンク

# 単なる「周波数ものさし」の先へ

- 光周波数計測でノーベル賞は出た
- しかし、光コムのパテンシヤルは周波数計測にとどまらない
  - ✓ 当初の予想を超え、爆発的に拡大中
- 実際の開拓は、まだこれから！

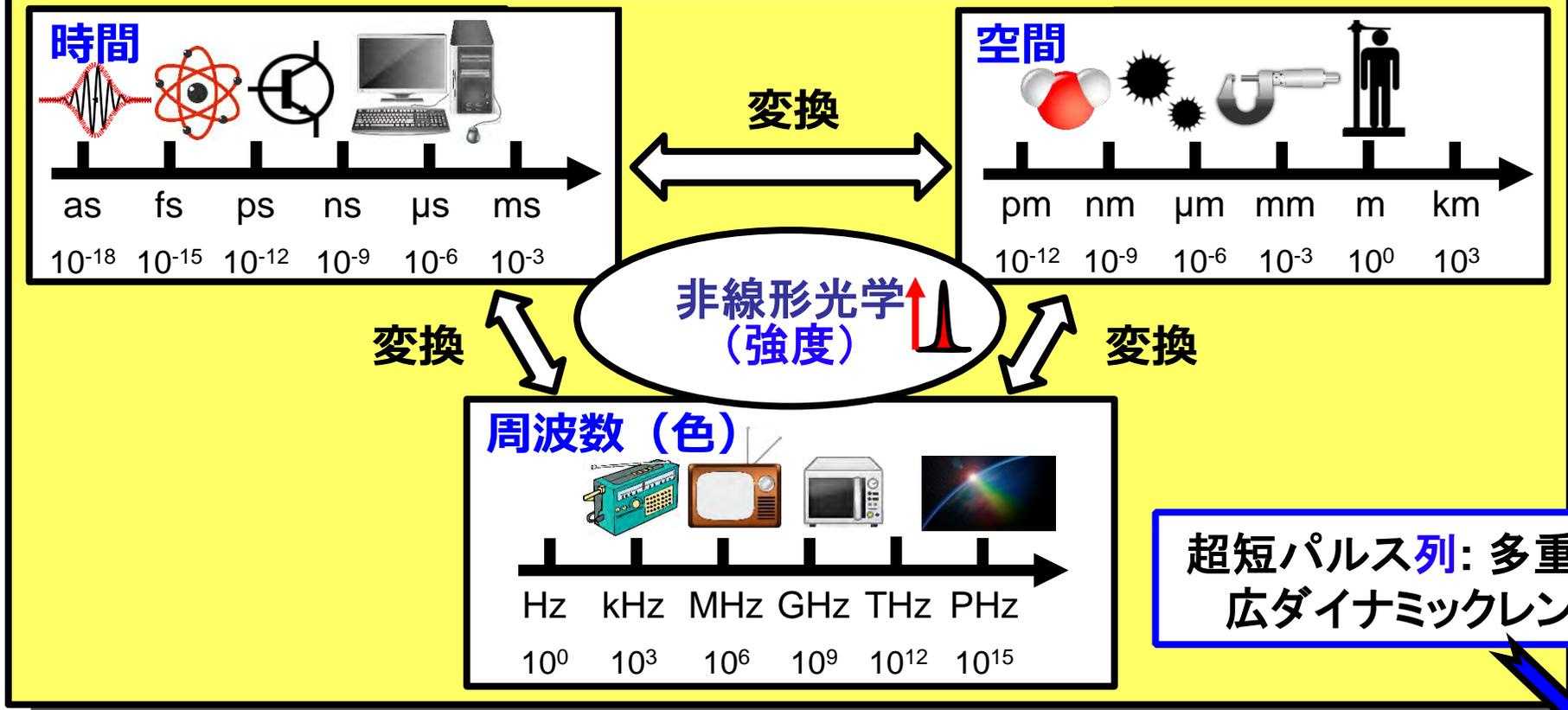
# 光コム ~ 単なる周波数リンクでない

## 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

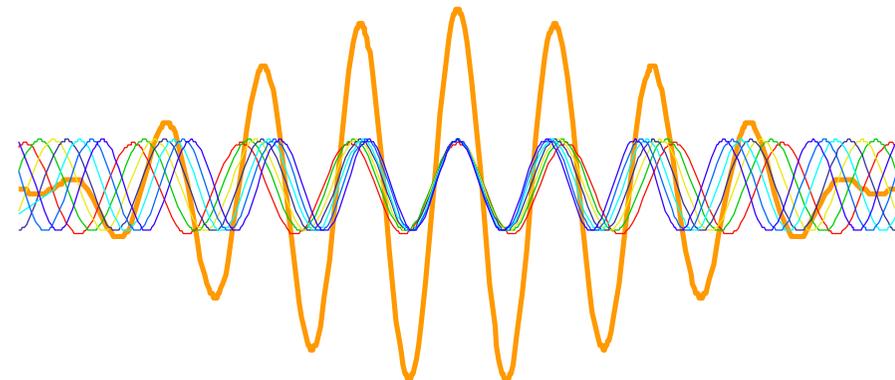
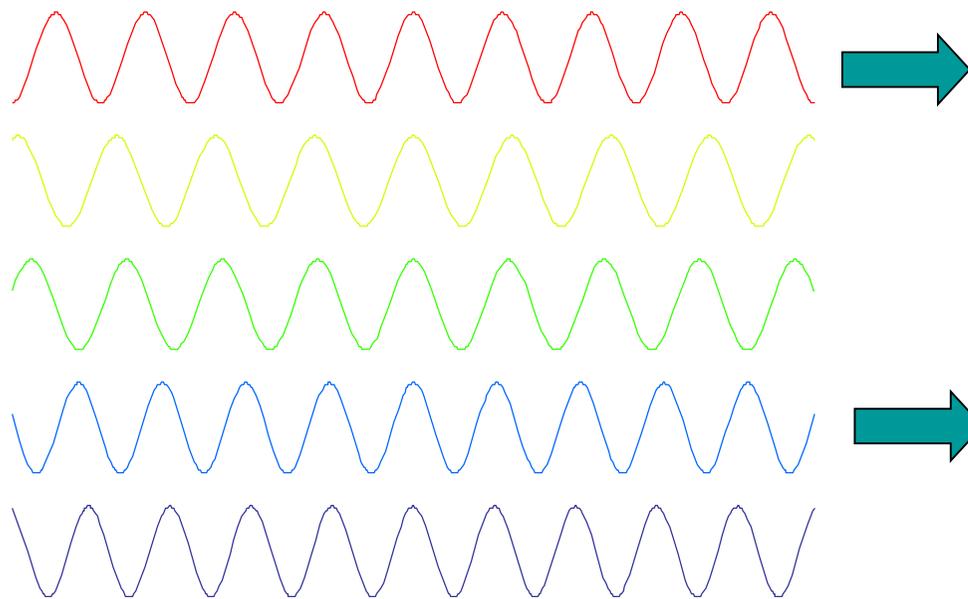
光コム・超短パルス:  
多次元性



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

# 超短パルスは波を重ねて作る

- 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

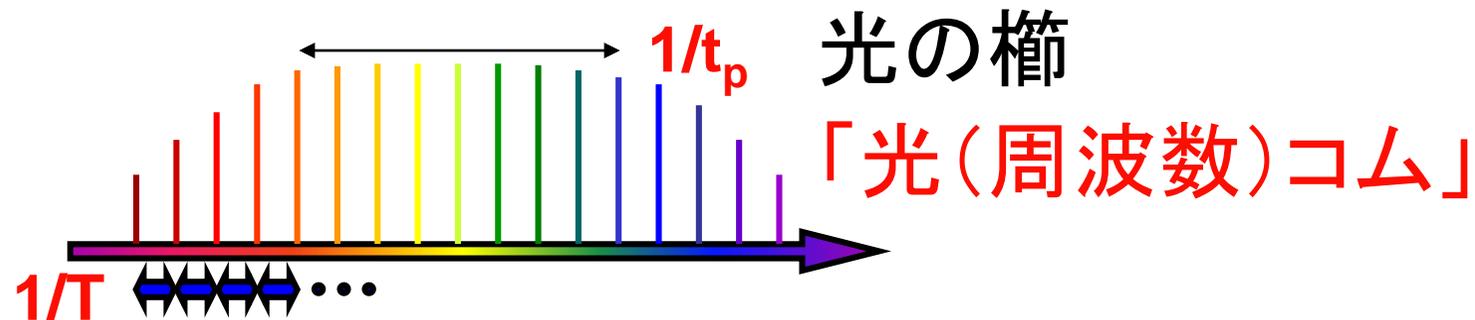
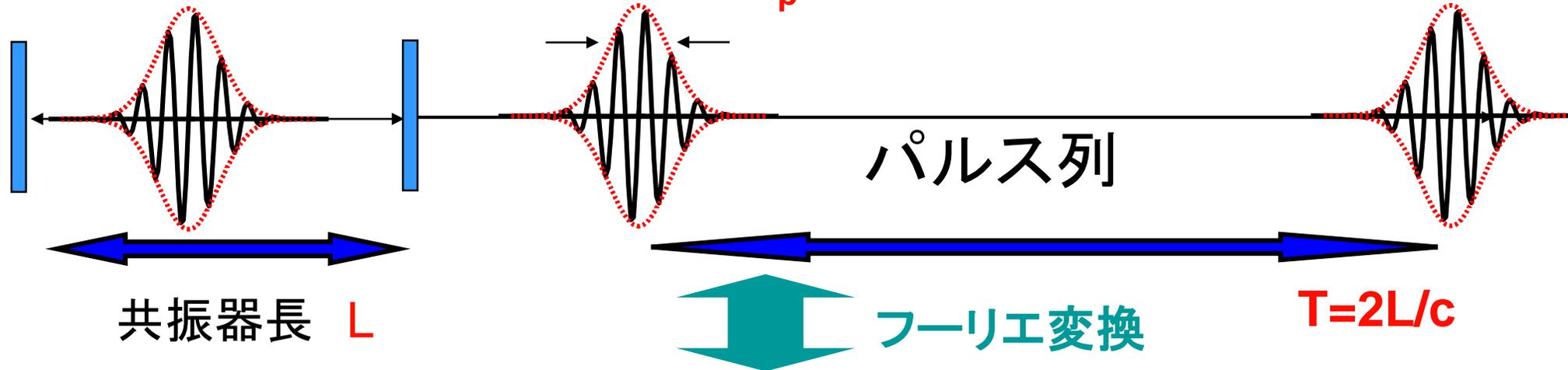


ばらばらに重ねる

ランダムな波。太陽光、電球など

# パルス“列”でコムになる

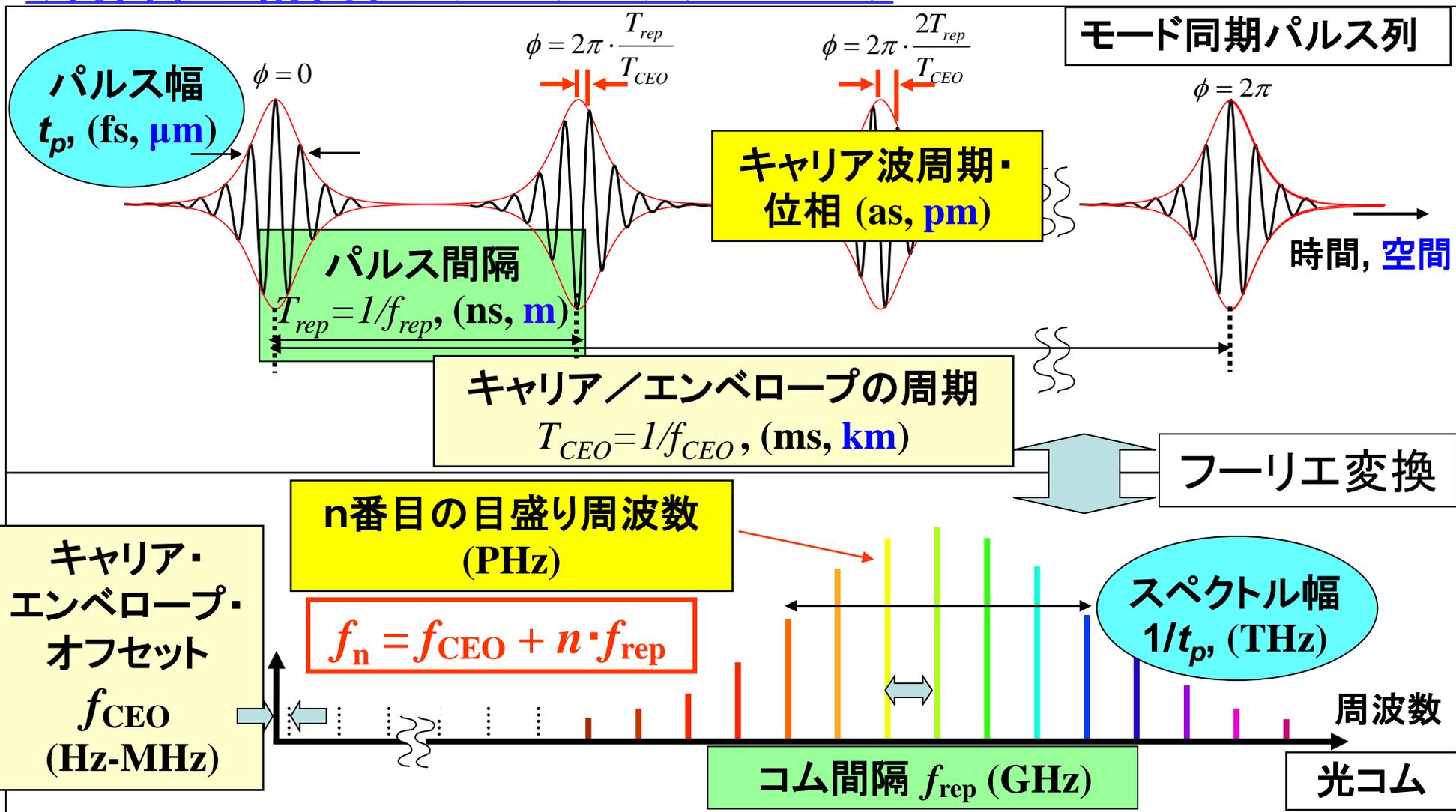
レーザー共振器



➤ 決まった周波数成分のみが生き残る: 周波数モード

1台で、何万台もの安定な連続波(CW)レーザーと同じ

# 多次元を網羅した多重な基準のコヒーレントリンク (制御性・精密性・ダイナミックレンジ)



# JST, ERATO 美濃島 知的光シンセサイザの目的

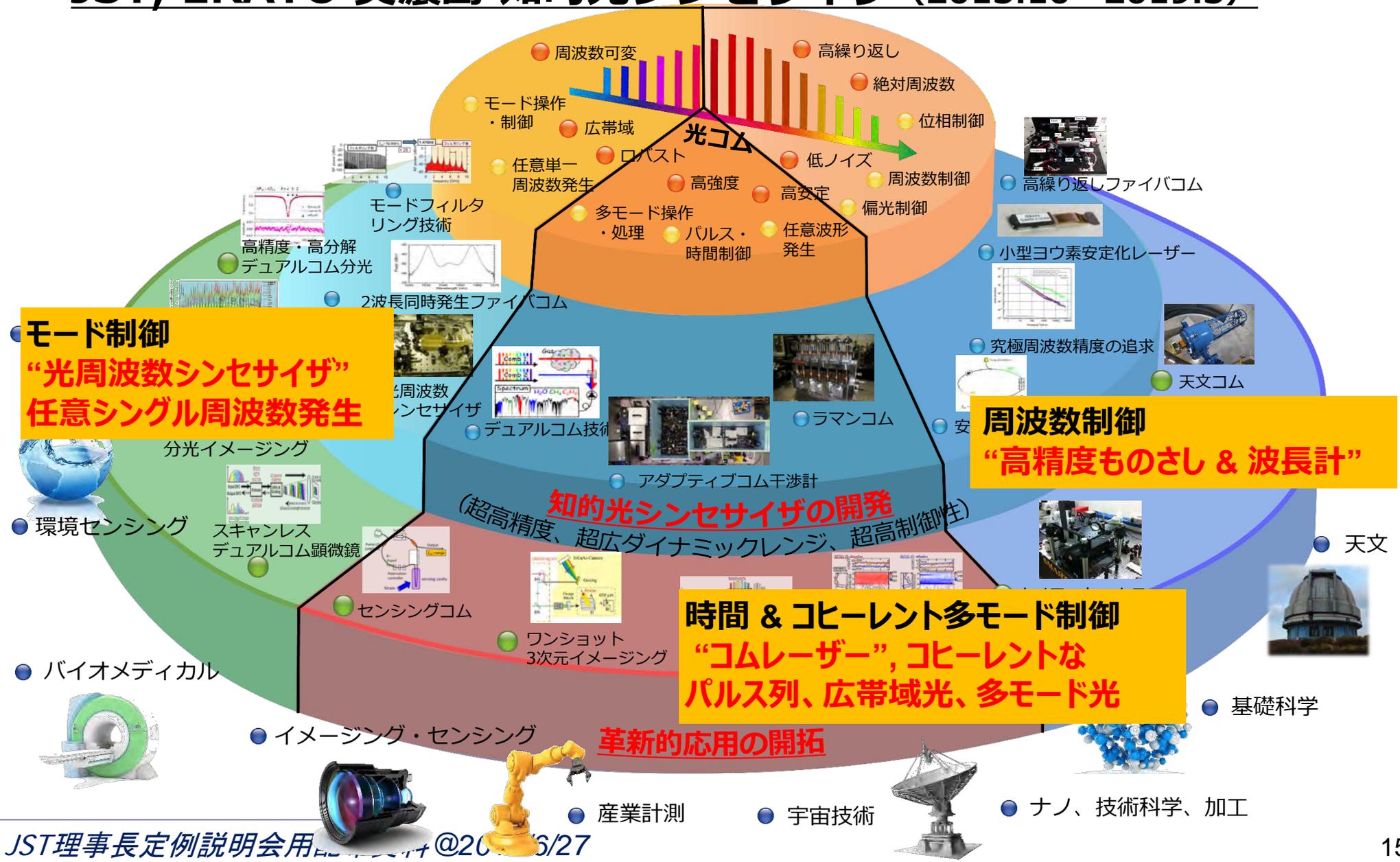
## ● 「知的光シンセサイザ」の開発

- 光コムを単なる「周波数ものさし」から飛躍させる
- 基盤的かつ革新的ツール「知的光シンセサイザ」に高める技術の開発

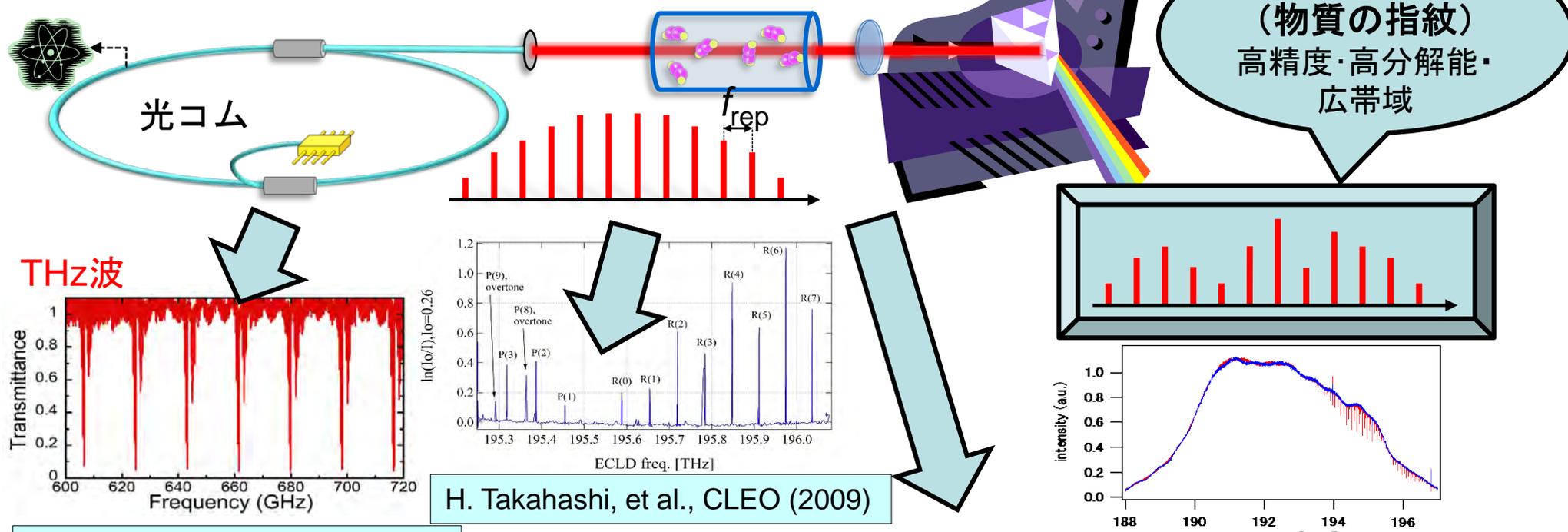
## ● 革新的応用の開拓

- 超精密分野から一步踏み出し、光の自在な操作とヘテロな要素・分野の融合によってこそ可能となる応用の新たな次元を見せる
- 応用基礎技術に一步踏み込み、これまで無縁だった新たな分野を呼び込む

# JST, ERATO 美濃島 知的光シンセサイザ (2013.10~2019.3)

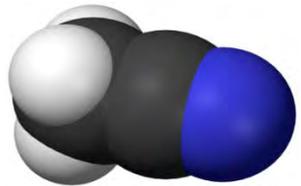


# 高精度分光・モード操作

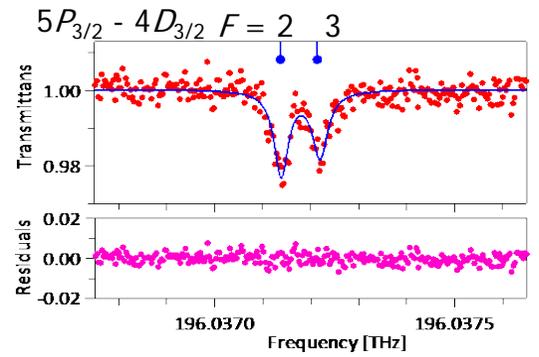
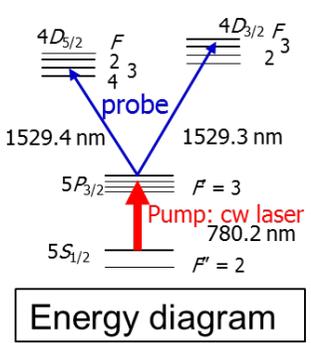


吸収スペクトル  
(物質の指紋)  
高精度・高分解能・  
広帯域

Y.-D. Hsieh, et al., J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 37, 903 (2015)



環境・燃焼計測



分光データベース、  
通信波長基準、  
呼気診断

A. Nishiyama, S. Yoshida, Y. Nakajima, H.Sasada, K.Nakagawa, A.Onae, K. Minoshima, Opt. Exp. 24, 25894 (2016)

# 固体材料・デバイスの高速・高精度な特性評価

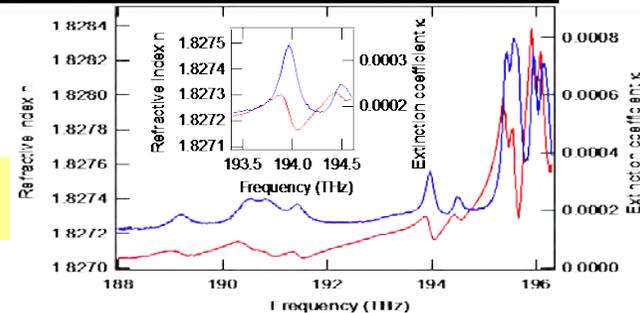
## “超高速 & 超精密分光”

### 1. 固体材料の複素特性

- 高速測定 ~10 ms / scan
- 複素屈折率スペクトルの詳細な構造を取得

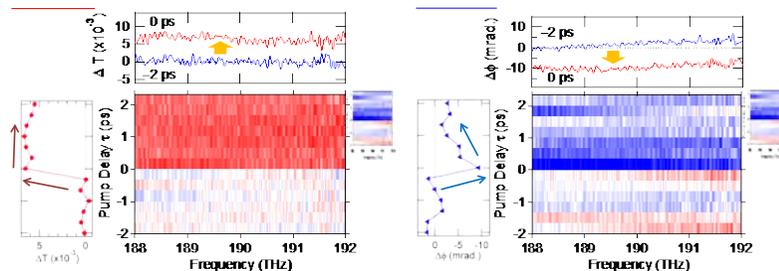


半導体、レーザー結晶



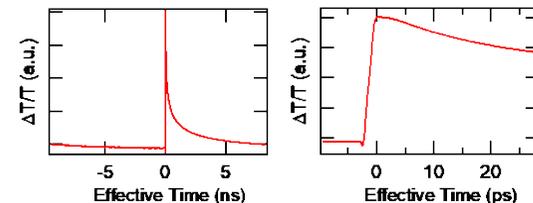
### 2. 超高速時間分解分光

- コム電場波形応答の観測
- 周波数・時間の2次元複素分光



### 3. ポンプ・プローブ非同期光サンプリング

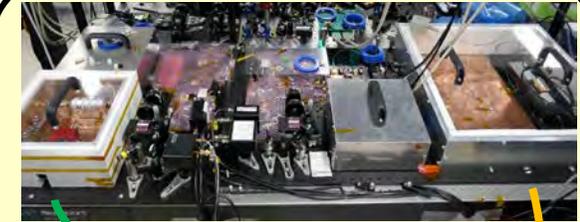
- 過渡吸収応答: fs~nsの高速取得(ms)



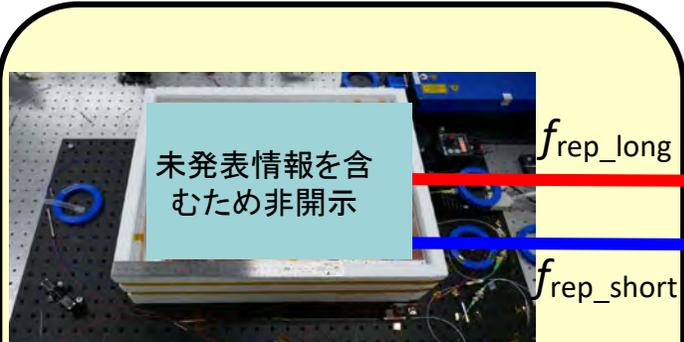
## 目的にあわせて測定条件を広範囲に調整可能なトータル物性評価ツール

時間・周波数の測定分解能、範囲、高速性、複素光学定数、複屈折、コヒーレンス...  
超高分解能 & 超広ダイナミックレンジ & 超高制御性

# オールファイバ『コム分光計』



遠隔地の任意の光源も  
利用できる

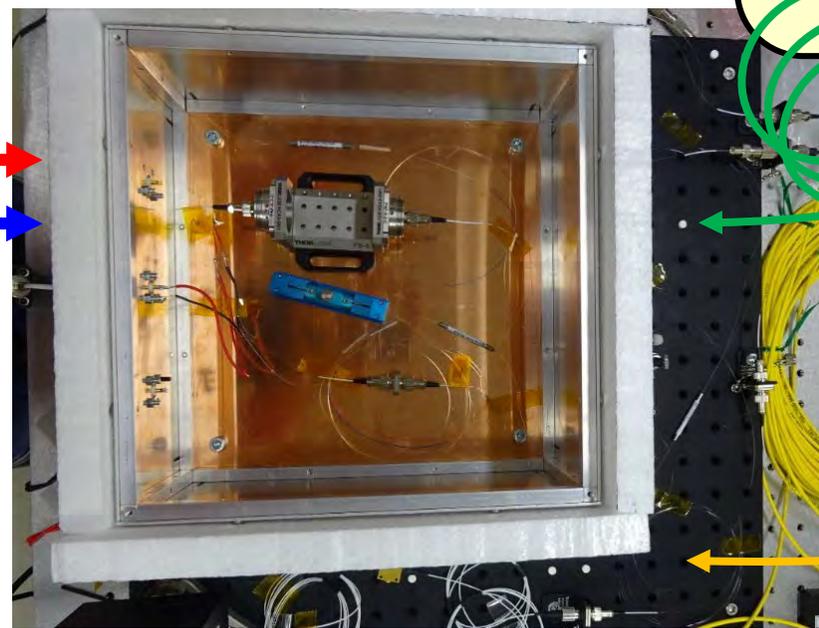


未発表情報を含むため非開示

$f_{rep\_long}$

$f_{rep\_short}$

2波長モード同期Erファイバレーザー  
(1台で2つのコムを同時発生)  
コンパクトな光源も利用できる



オールファイバのデュアルコム分光計

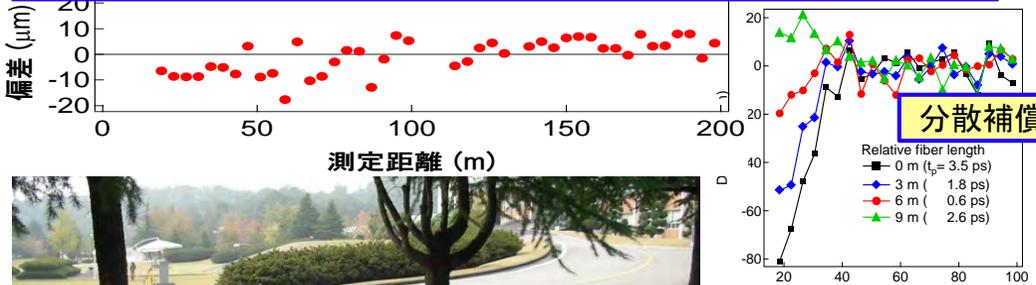
- コンパクト、安定、自由度が高い
- 単なる吸収測定でない、**トータルな分光システムへ**  
(線形、非線形、複素特性、時間分解、周波数分解、偏光 etc…)

# コム距離計：コム応用のさきがけ

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

**世界最高精度の距離計**  
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

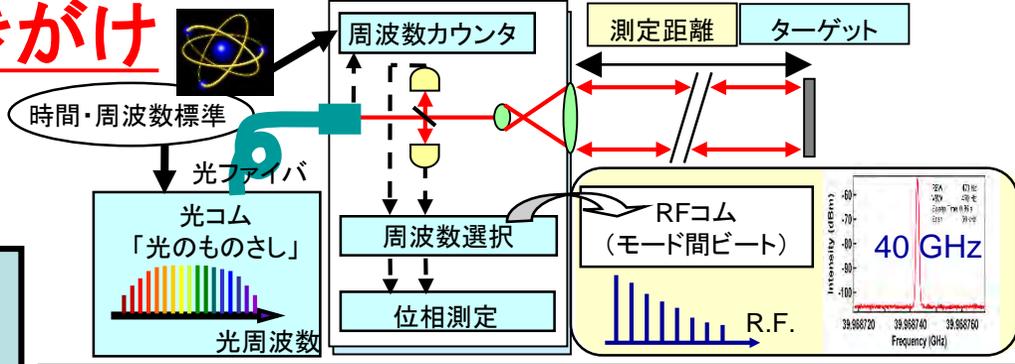


高精度ファイバ伝送 (256 m)



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**  
 $f = 50$  MHz, 10 GHz, 40 GHz (821<sup>st</sup> 高調波)

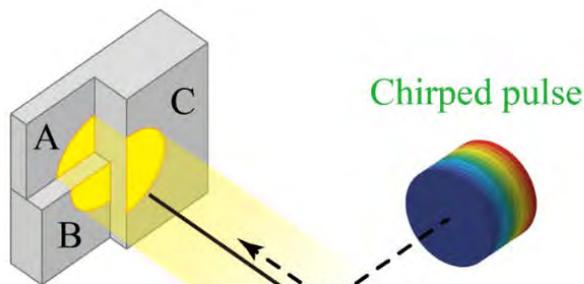


短距離タイプ

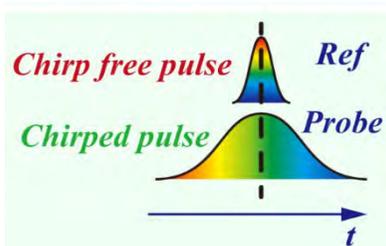
組み込み可能  
参照標準との差  
2  $\mu\text{m}/10 \text{ m}$

- 究極の超長距離測定  $\sim \text{pm}/\text{km}$  宇宙応用
- 絶対距離測定 & 環境変動のリアルタイム高精度自己補正の実現
  - ・外乱の多い場所での絶対距離測定
  - ・省エネ精密計測
  - ・オペレーション中の検査・モニター

# ファイバ・コムによるワンショット3次元イメージング

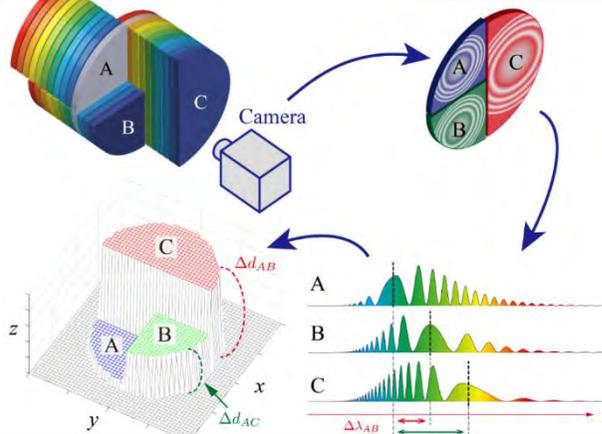
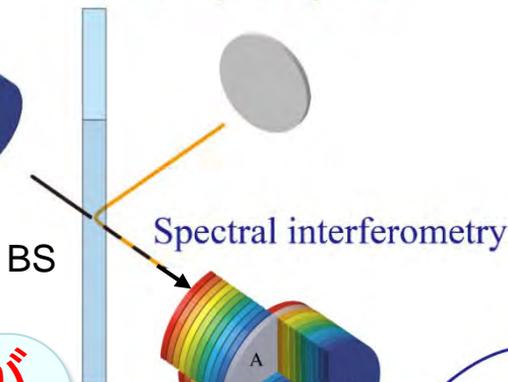


Chirped pulse



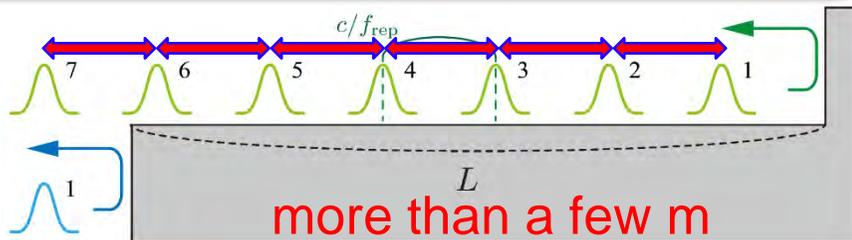
チャープで時間情報が色情報に瞬時に変換。  
2次元波長分布から、  
ワンショットで3次元  
イメージが得られる

Chirp free pulse

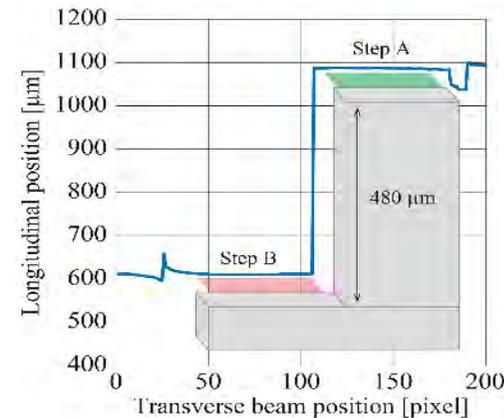


コム干渉(パルス間干渉)を利用

- ⇒ 大きいサイズや離れた面の形状を、精度を落とさず、ワンショットで測定できる
- ⇒ 高精度・高速・広ダイナミックレンジ、計測技術の基礎的トレードオフ回避



3mの段差形状を±1 μmで無走査測定

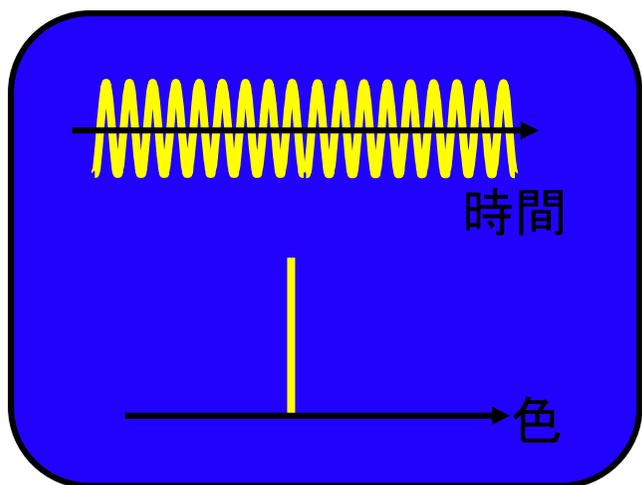


# 直交する分野

超精密の世界(連続に続く波)

「連続波レーザー」  
の世界

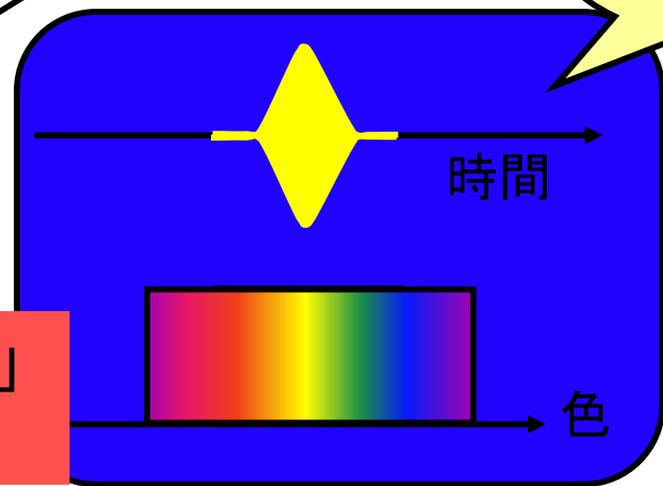
より純粋な波に



相容れない世界

「超短パルスレーザー」  
の世界

より短い時間へ

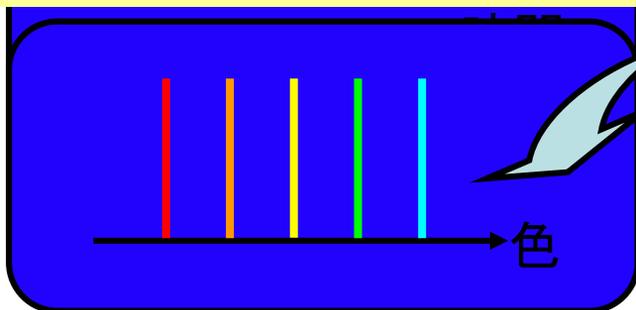


超高速の世界(一瞬のみ光るパルス)

# 直交する分野

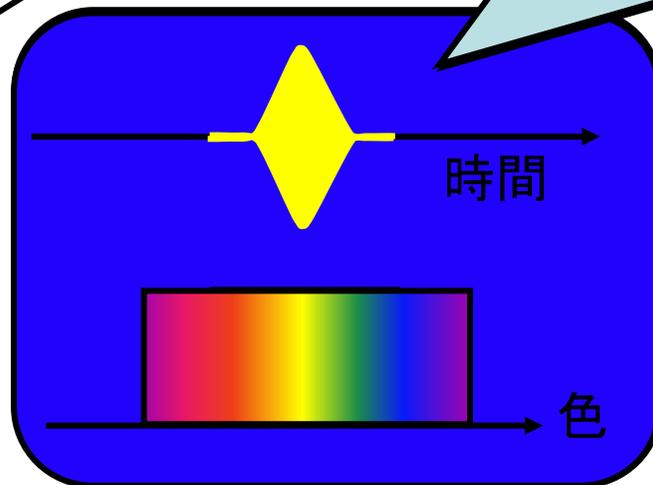
超精密の世界(連続に続く波)

実は、多数の超精密な「連続波レーザー」ができていた。



極限パルス発生・制御技術が進むと.

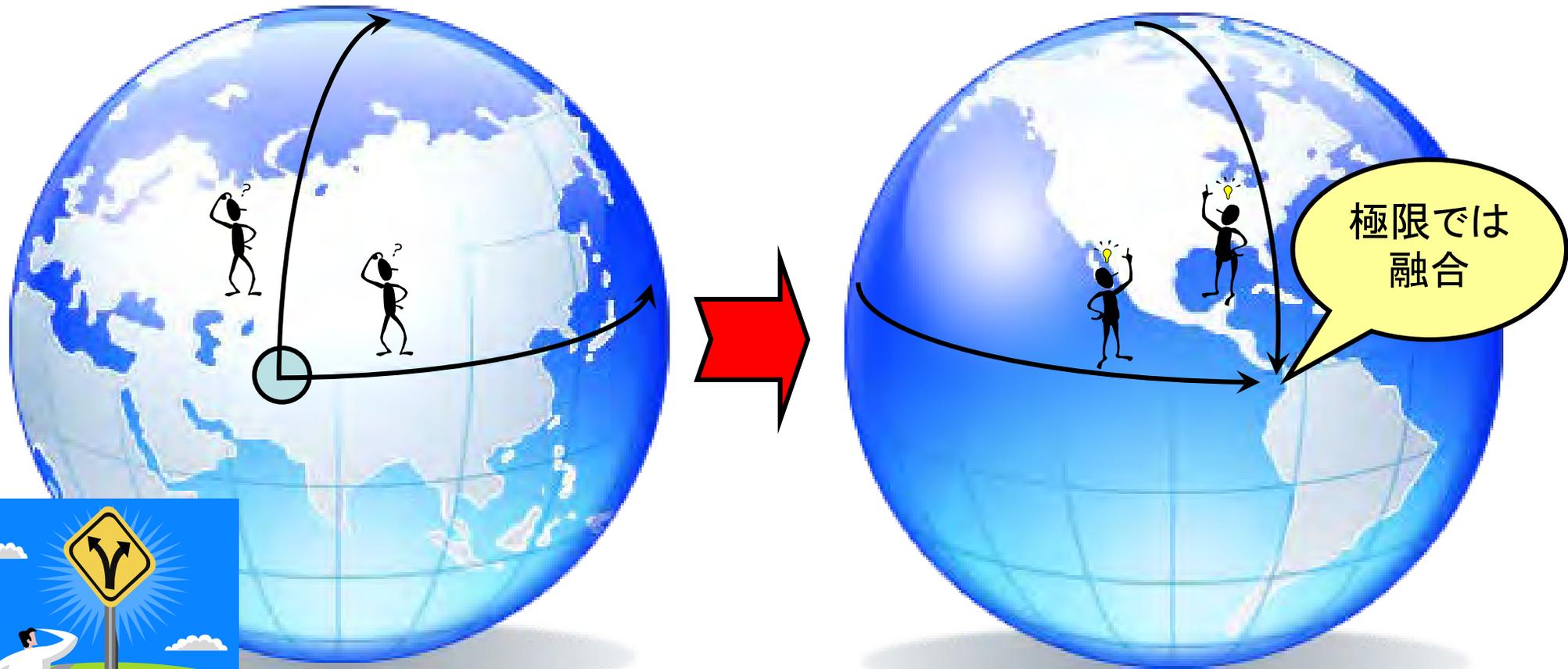
どんどん時間を短くしていくと、より遠くなっていくようだが...



相容れない世界が繋がった!  
革命的融合  
“光コム”

超高速の世界(一瞬のみ光るパルス)

# 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**

# 今後の方向性

「光を自由自在に操作し、使い尽くす」

- 光を真にインテリジェントなメインプレーヤーに
  - 極限精度、ダイナミックレンジ、アダプティブ性
  - 対象や環境に応じ、自在に条件選択。
  - 計測、伝送、表示、利用、物性制御や加工まで、トータルな光技術
- あらゆる科学技術の画期的進展へ
  - 基盤科学技術は広範な分野を支え、同時に牽引
  - “Metrology, the Mother of Science\*” 科学技術も、人も育つ

\* J. Hall, Nobel Lecture (2005)