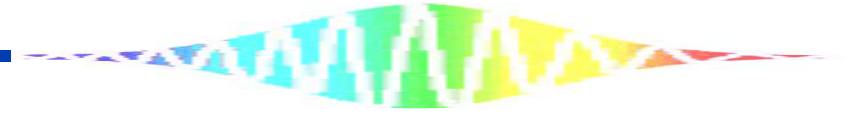


光コムとTHzコム

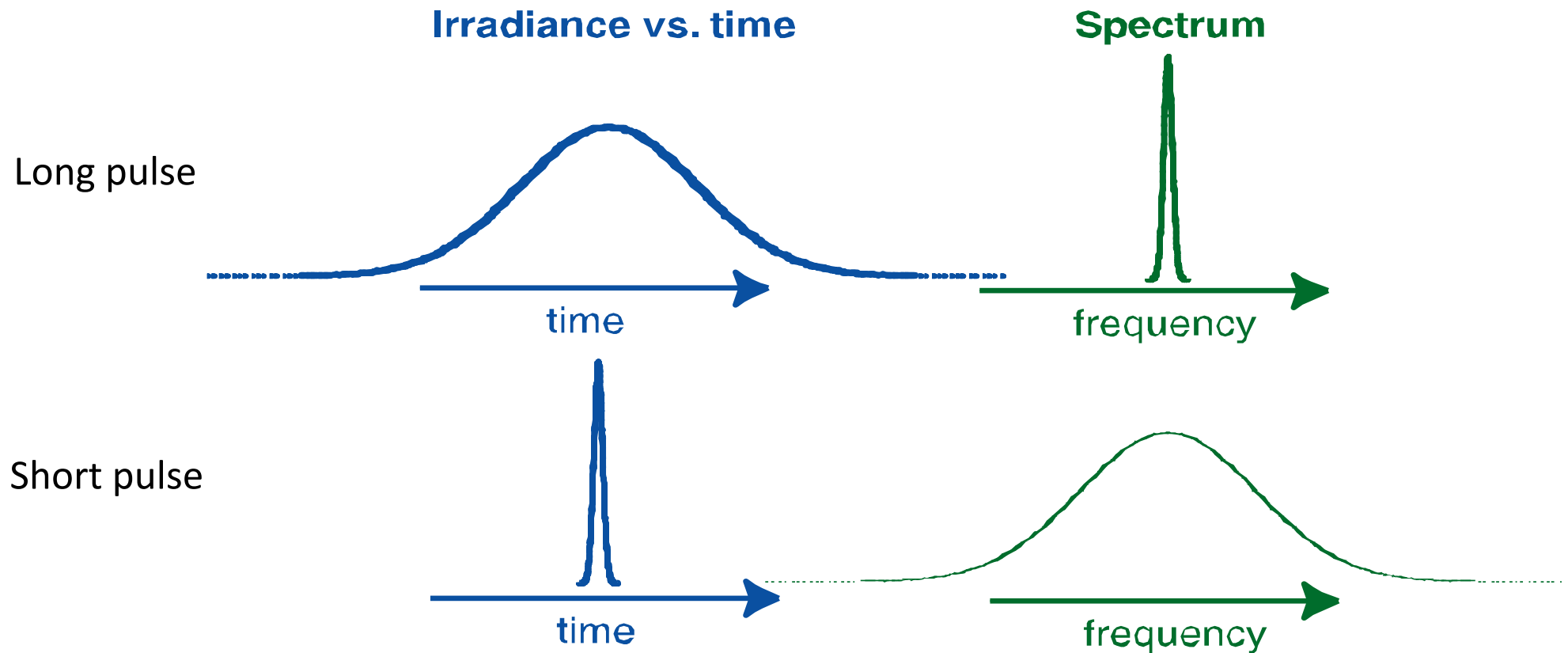
安井武史

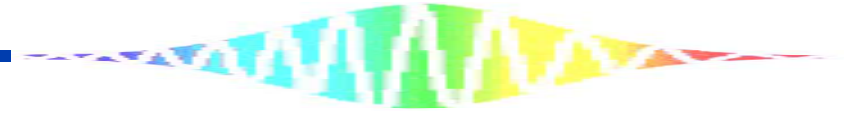


光コムとは？

Transfer-limited pulses of light

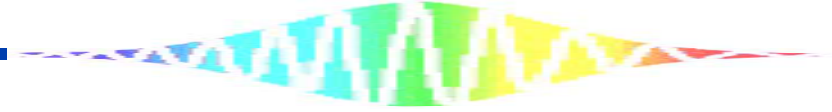
- The uncertainty principle says that the product of the temporal and spectral pulse widths is greater than ~ 1 .





What is a transfer-limited broadband source?

Answer: “Mode-locked” Laser

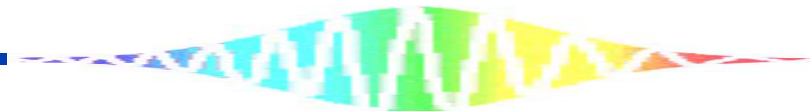


Standing wave criteria in laser cavity

$$L = n\lambda/2, \quad L = \text{cavity length}, \quad n = \text{integer}$$

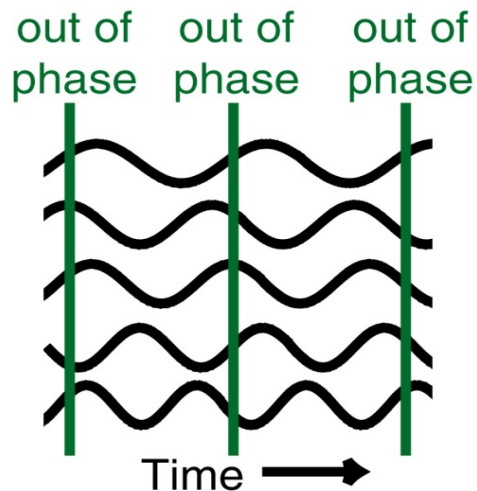
frequency difference between modes, or
repetition rate

$$\Delta f = (n+1)c/2L - nc/2L = c/2L$$



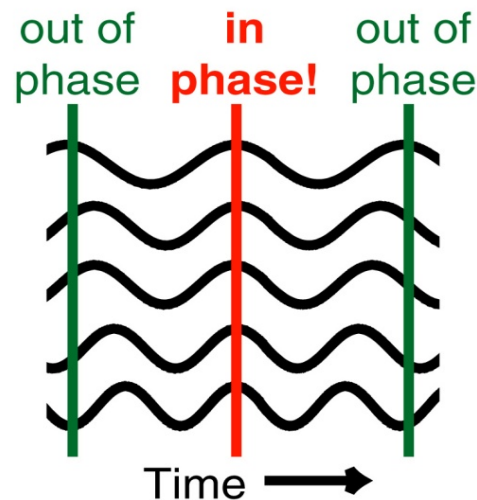
- Locking the phases of the laser modes yields an ultrashort pulse.

Random
phases
of all
laser
modes

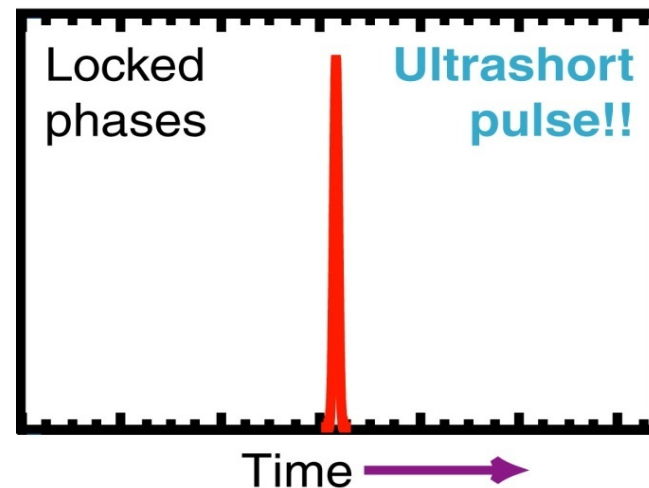
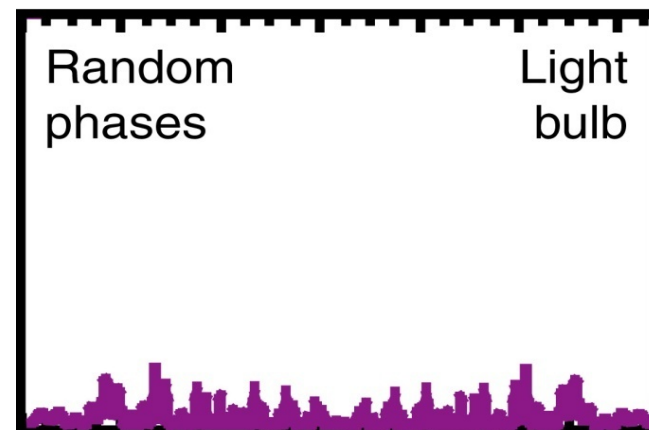


$W_1 T - W_2 T = 2np$, $T = \text{round trip time}$

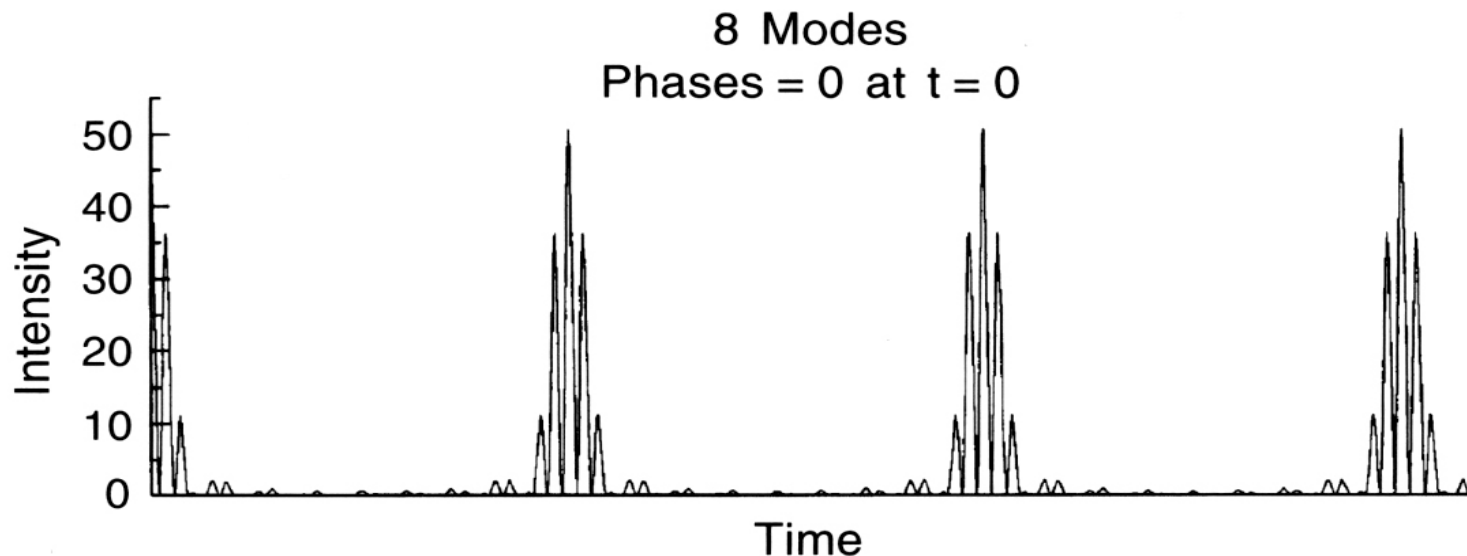
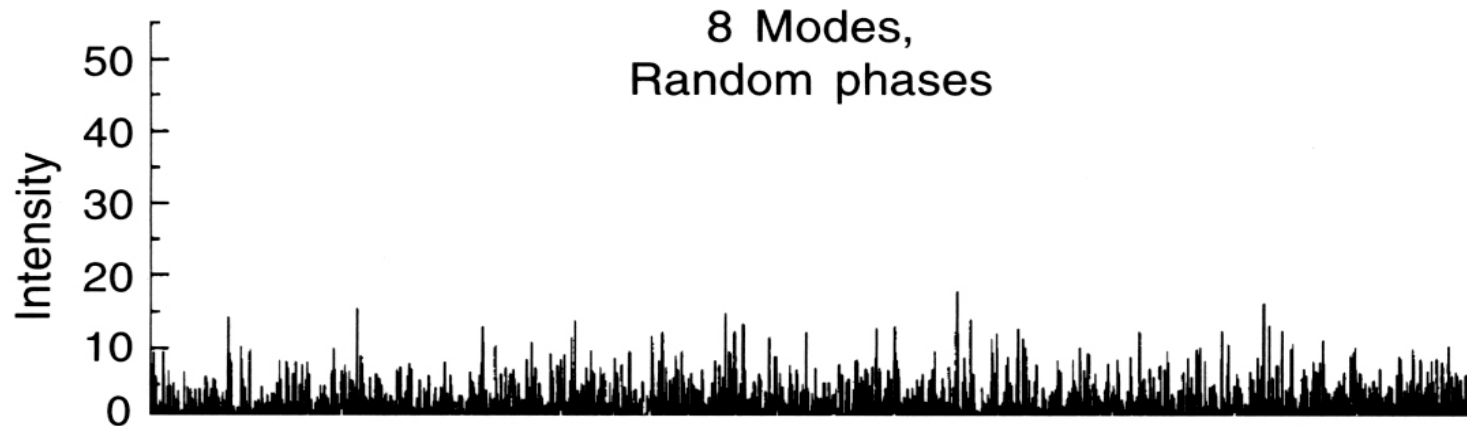
Locked
phases
of all
laser
modes



Irradiance vs. time



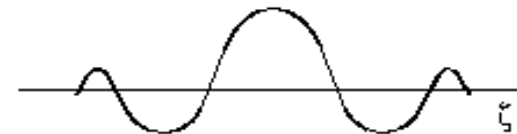
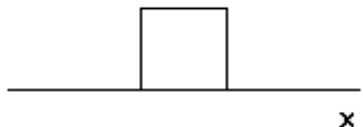
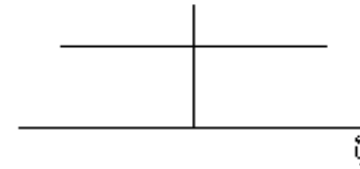
Numerical simulation of mode-locking

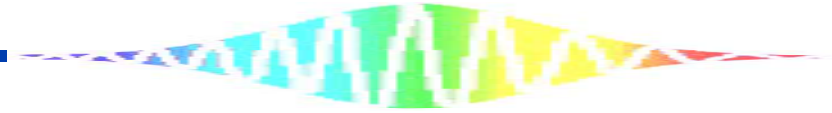


Ultrafast lasers often have thousands of modes.



Fourier Transform of Comb Function

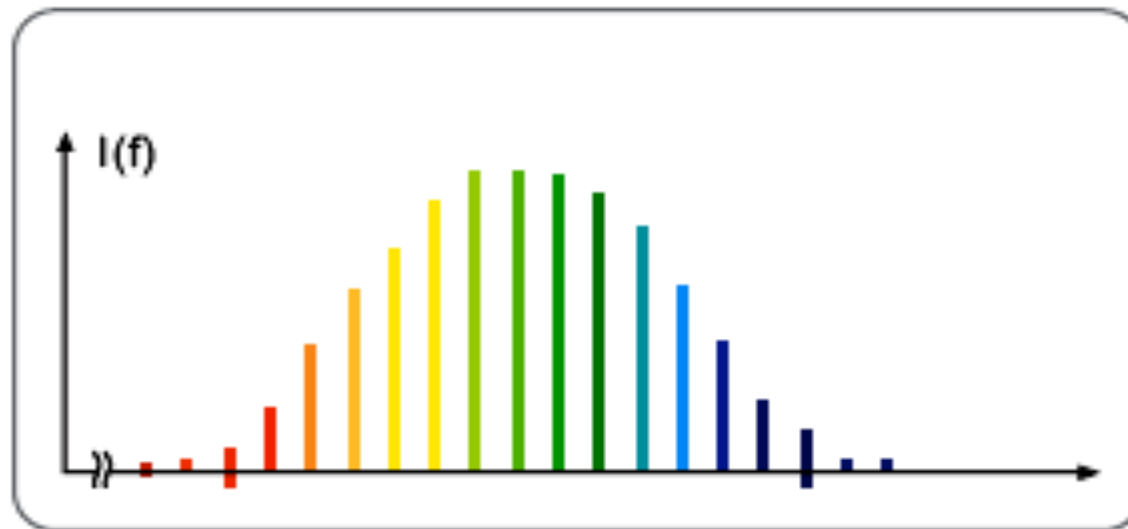




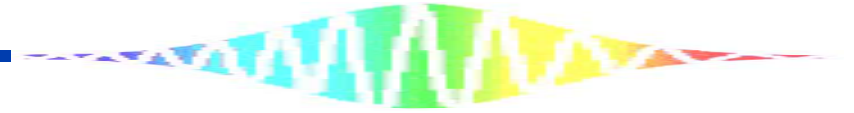
Optical Frequency Comb

Optical spectra consisting equidistant lines

Optical (frequency) ruler

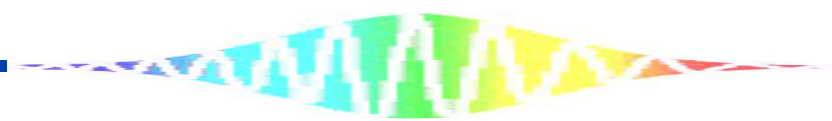


 The output of any mode-locked laser is an OFC.

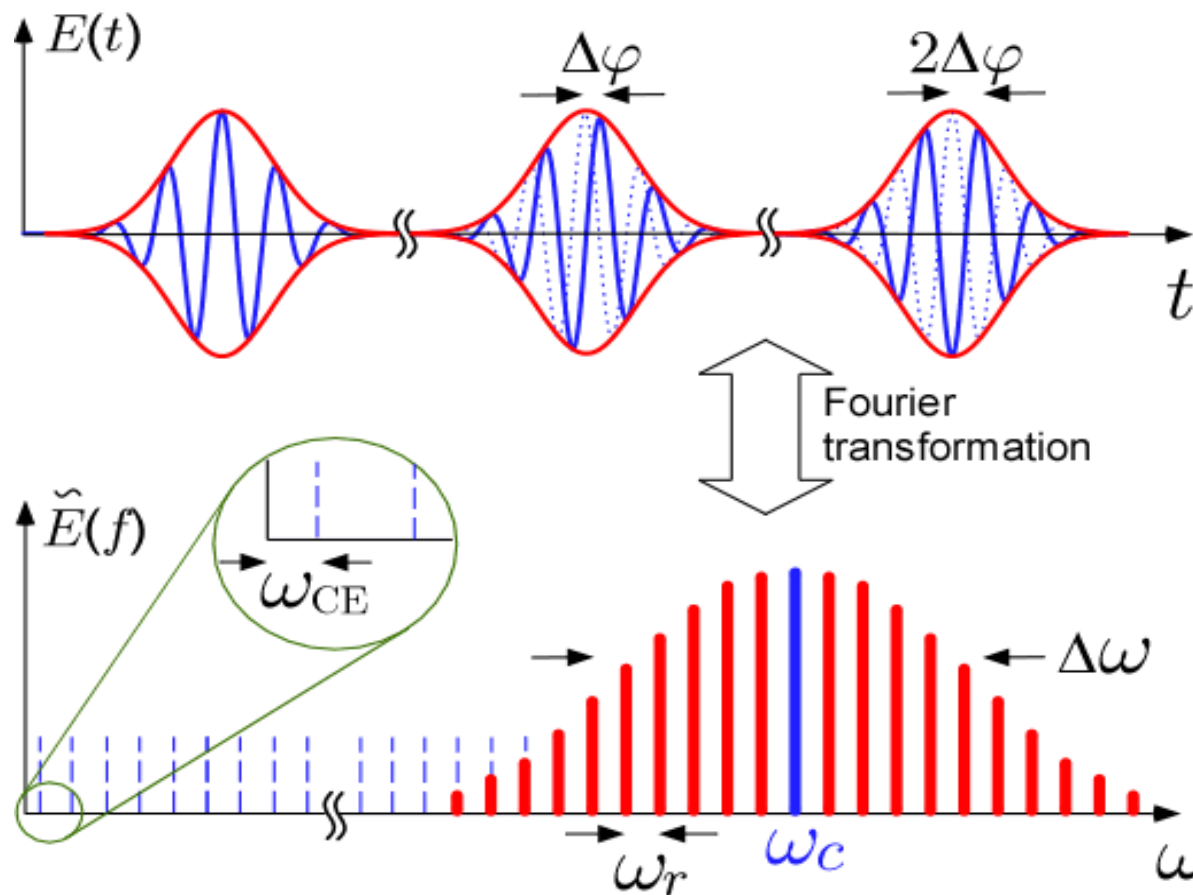


phase velocity \neq group velocity

Mode-locked laser is not a good frequency ruler.



Frequency Comb

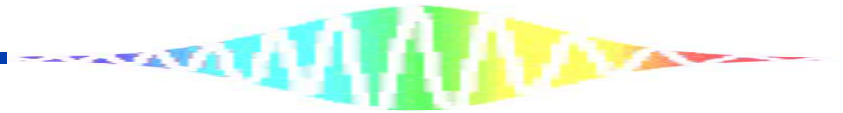


Ti:Sapphire Kerr-lens
mode locked laser

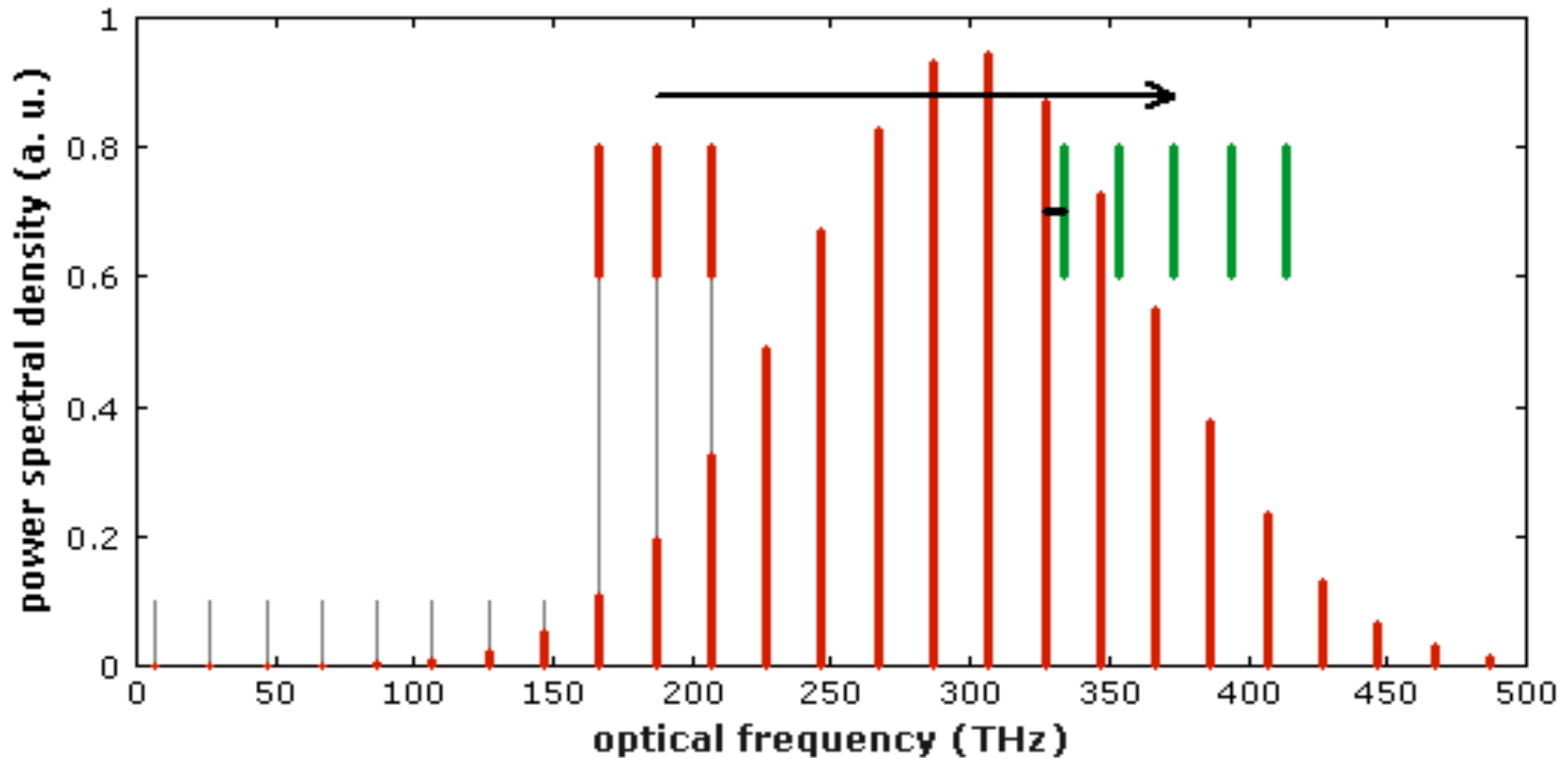
$\omega_r = 1/T$, T: repetition time
Controlled by cavity length

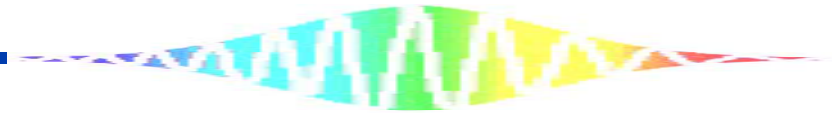
$\Delta\varphi$ pulse-to-pulse carrier
envelope phase shift
Controlled by pulsed power

$$\omega_n = n\omega_r + \omega_{CE}$$

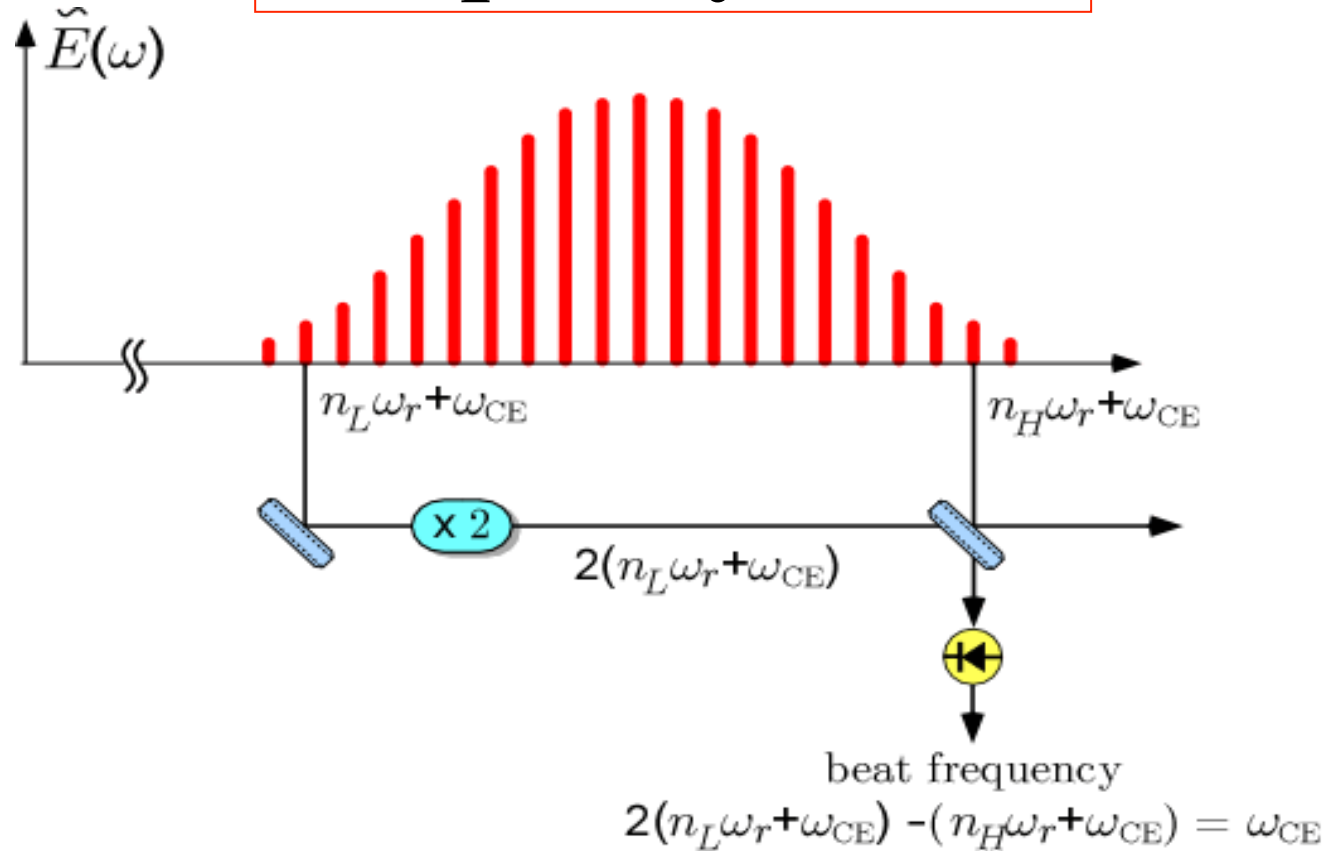


f-2f self-referencing technique

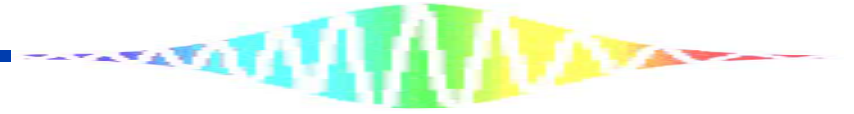




Frequency Comb



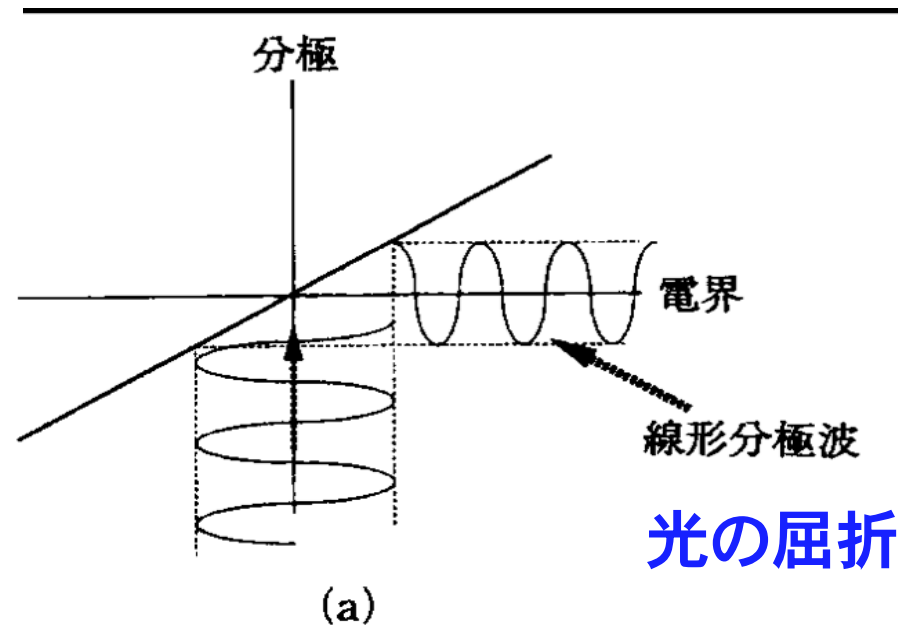
$$Dn/n = 1 \times 10^{-15}$$



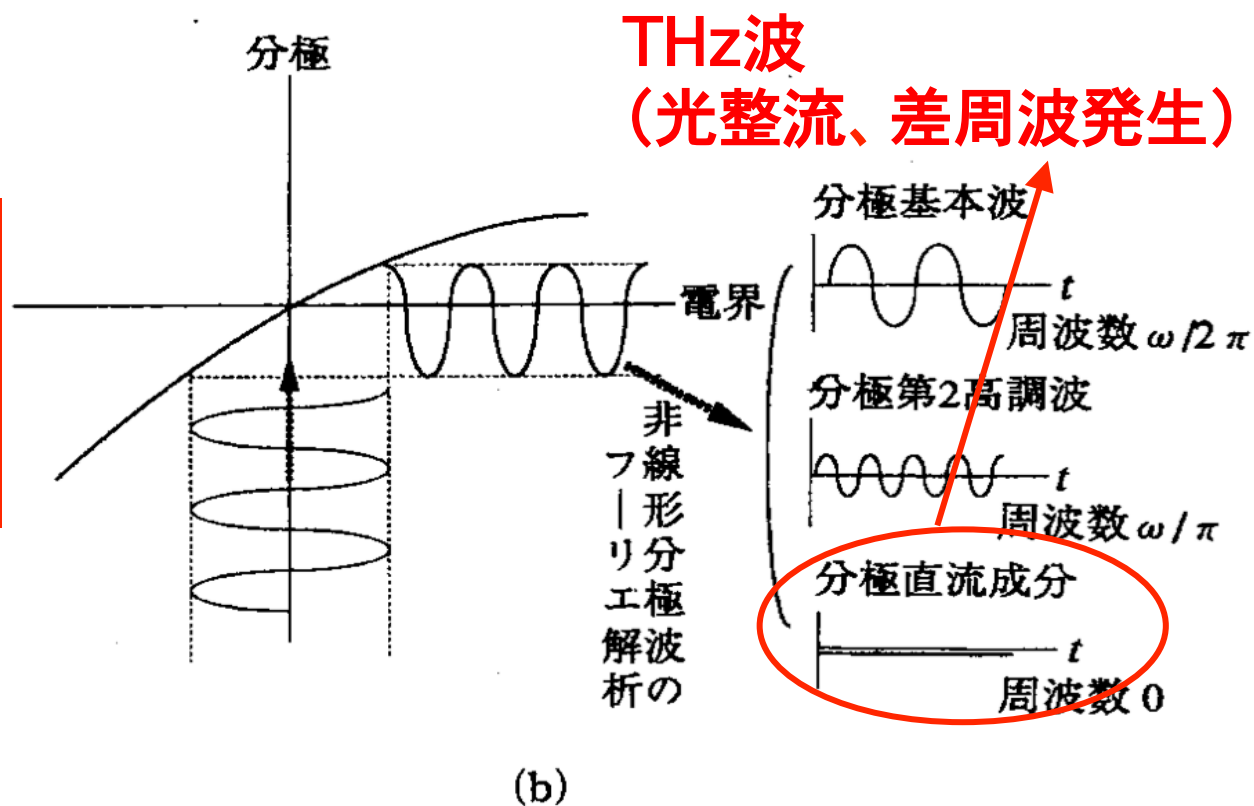
所有するTHzコム計測技術
(基本的には光コムでも同
様なことが可能)

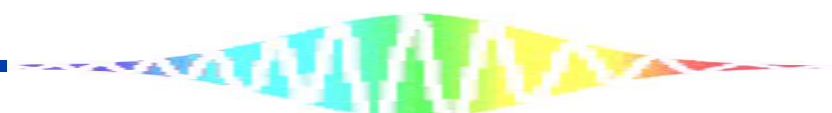
線形分極と非線形分極 (分極: 電荷の偏り)

線形分極
(従来の光)



非線形分極
(超短パルス光@
非中心対称物質)

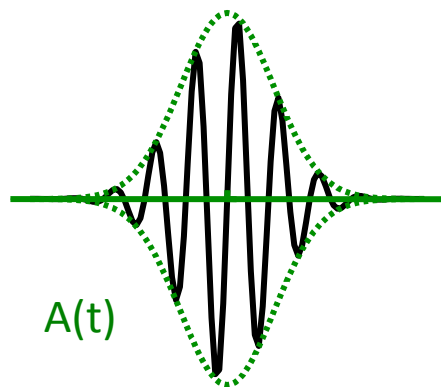




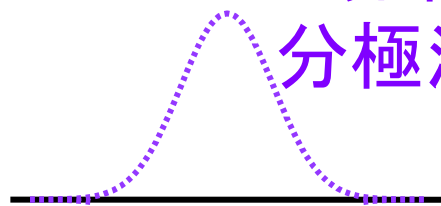
非線形光学結晶 (光整流)

$$E_{NIR}(t) = \frac{1}{2} A(t) \exp(-i\omega t)$$

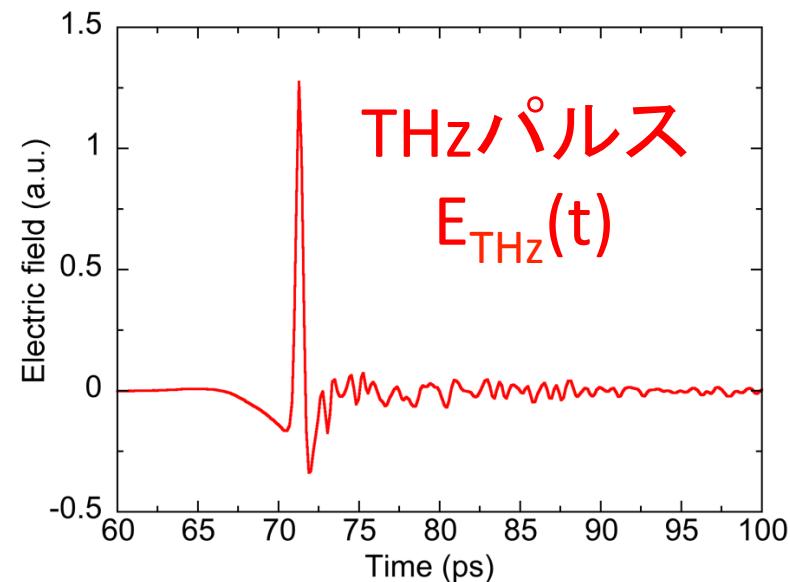
近赤外フェムト秒パルス光



非線形
分極波 P(t)

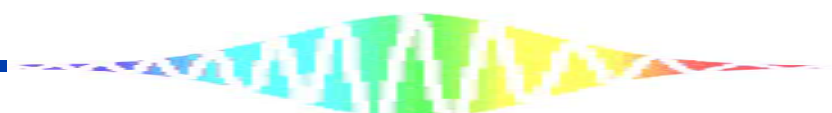


非線形
光学結晶

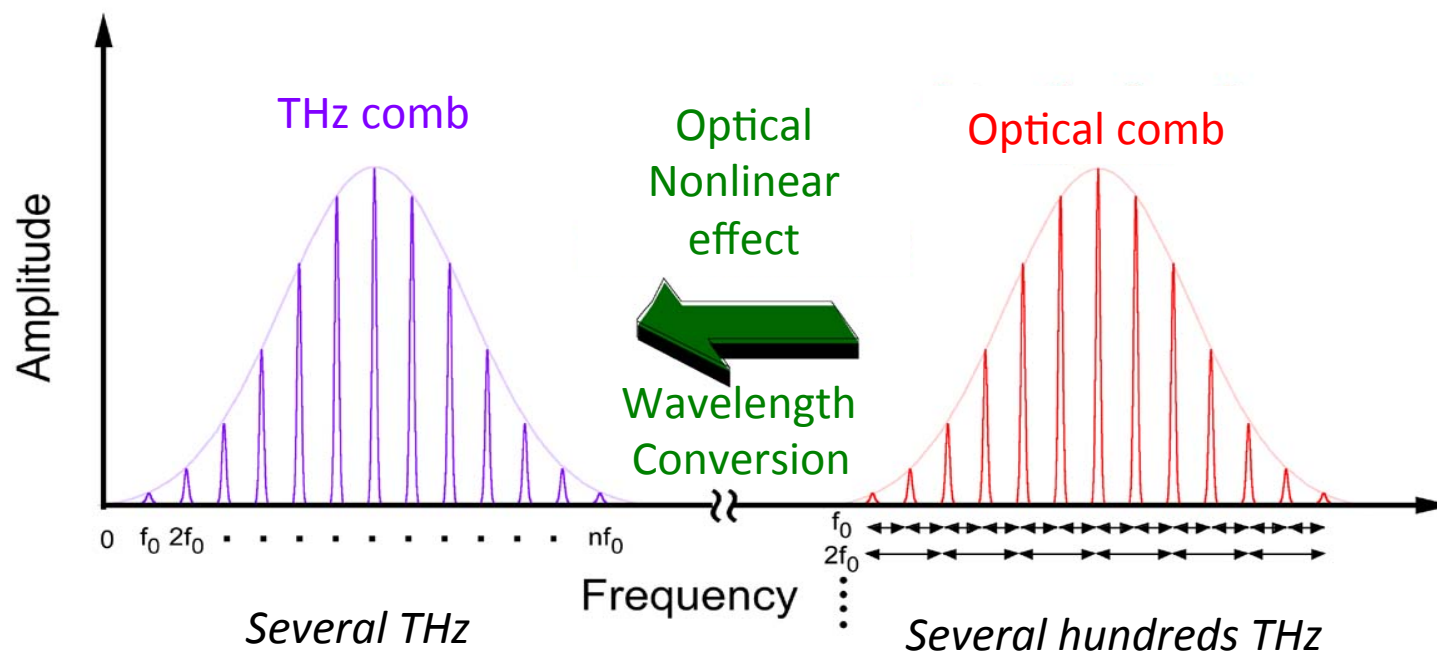
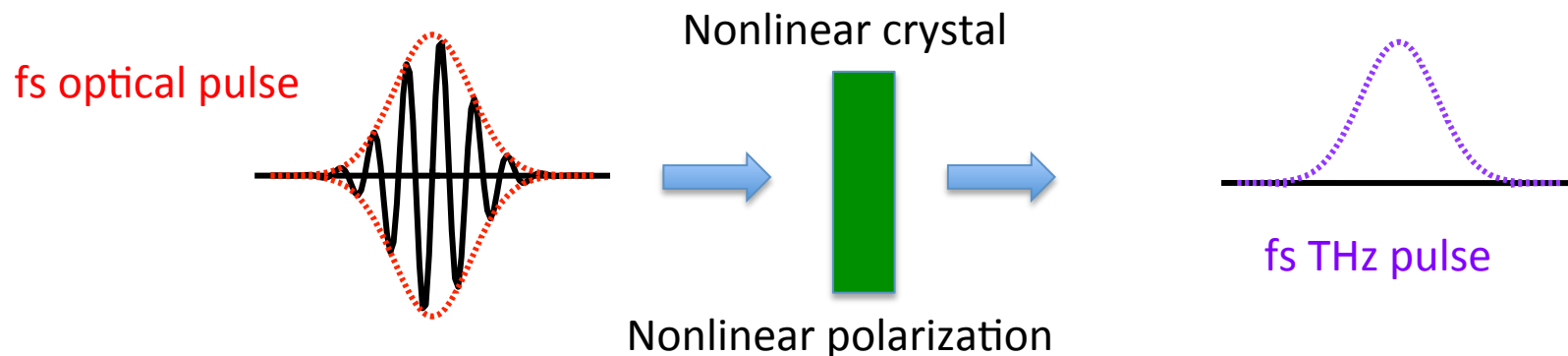


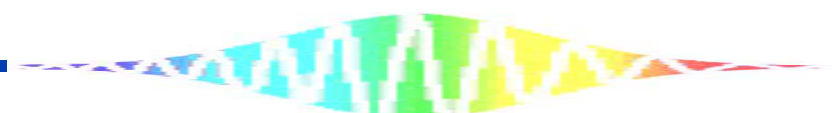
$$P(t) \propto \frac{1}{2} \epsilon_0 \chi^{(2)} |A(t)|^2$$

$$E_{THz}(t) \propto \frac{\partial^2 P(t)}{\partial t^2}$$

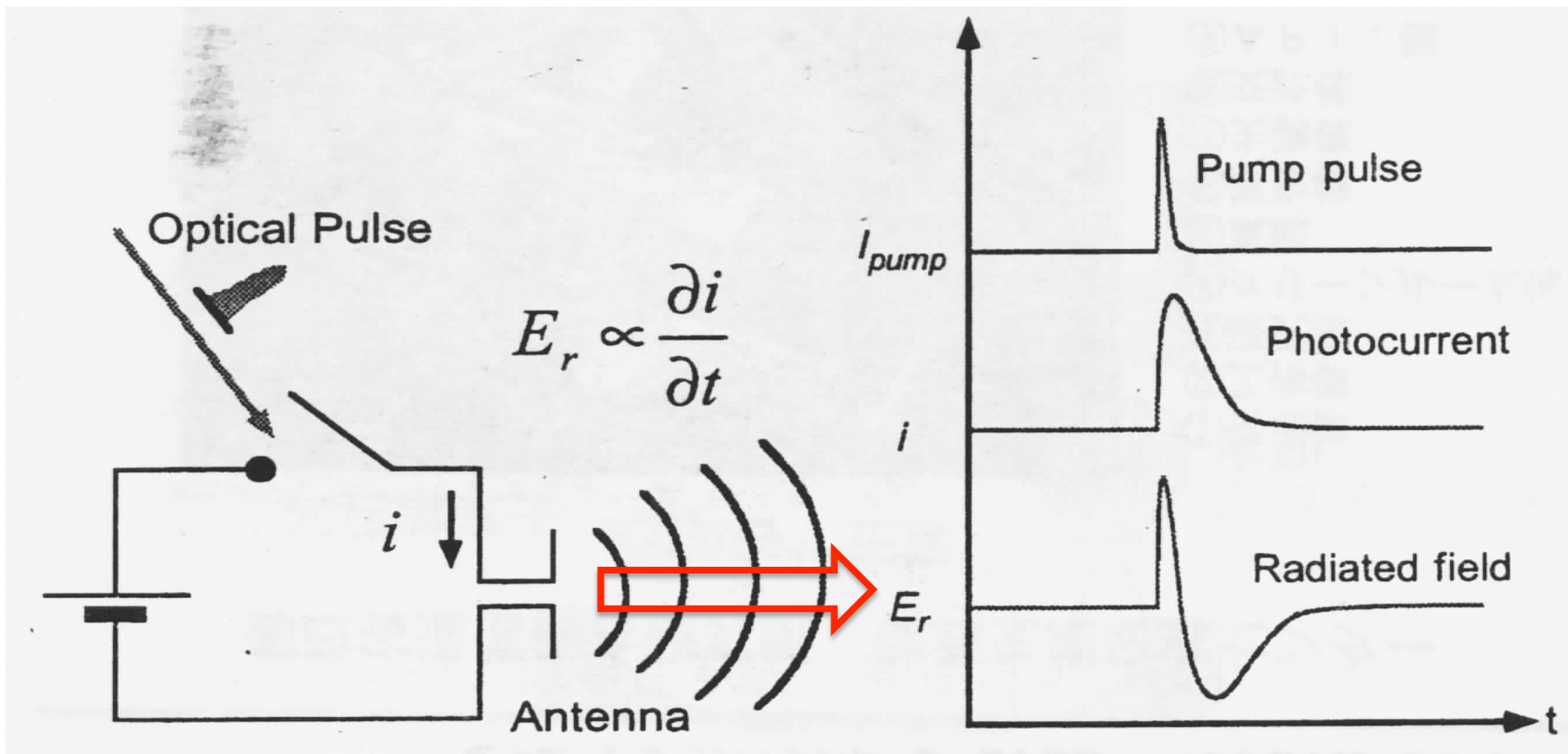


非線形光学結晶（差周波発生）





光伝導アンテナ (双極子放射)

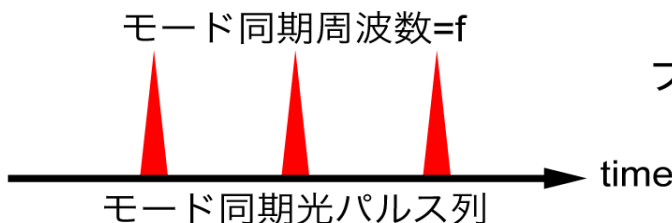


光コムとTHzコム

2005年ノーベル物理学賞

時間領域

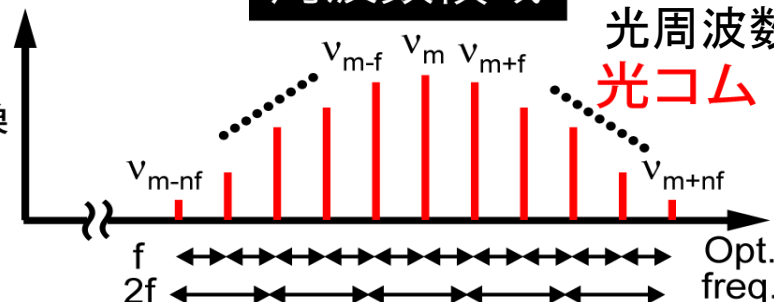
フェムト秒光パルス列



フーリエ変換

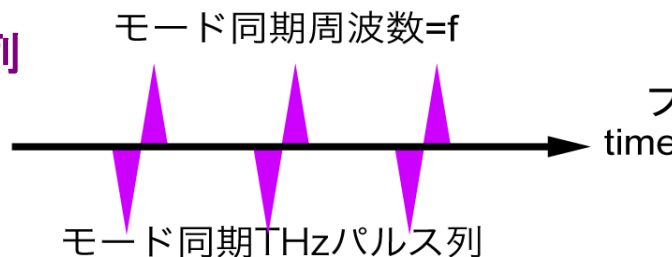
周波数領域

超精密分光
光周波数標準



光伝導アンテナ or 非線形光学結晶

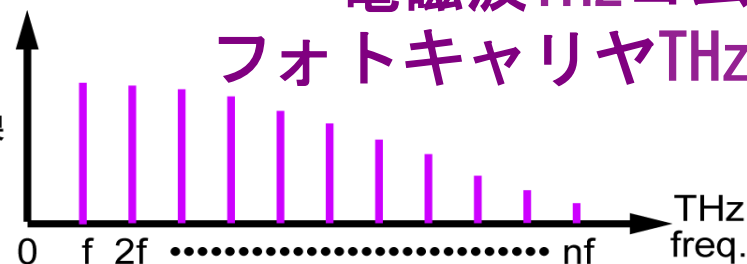
THzパルス列



フーリエ変換

電磁波THzコム

フォトキャリアTHzコム

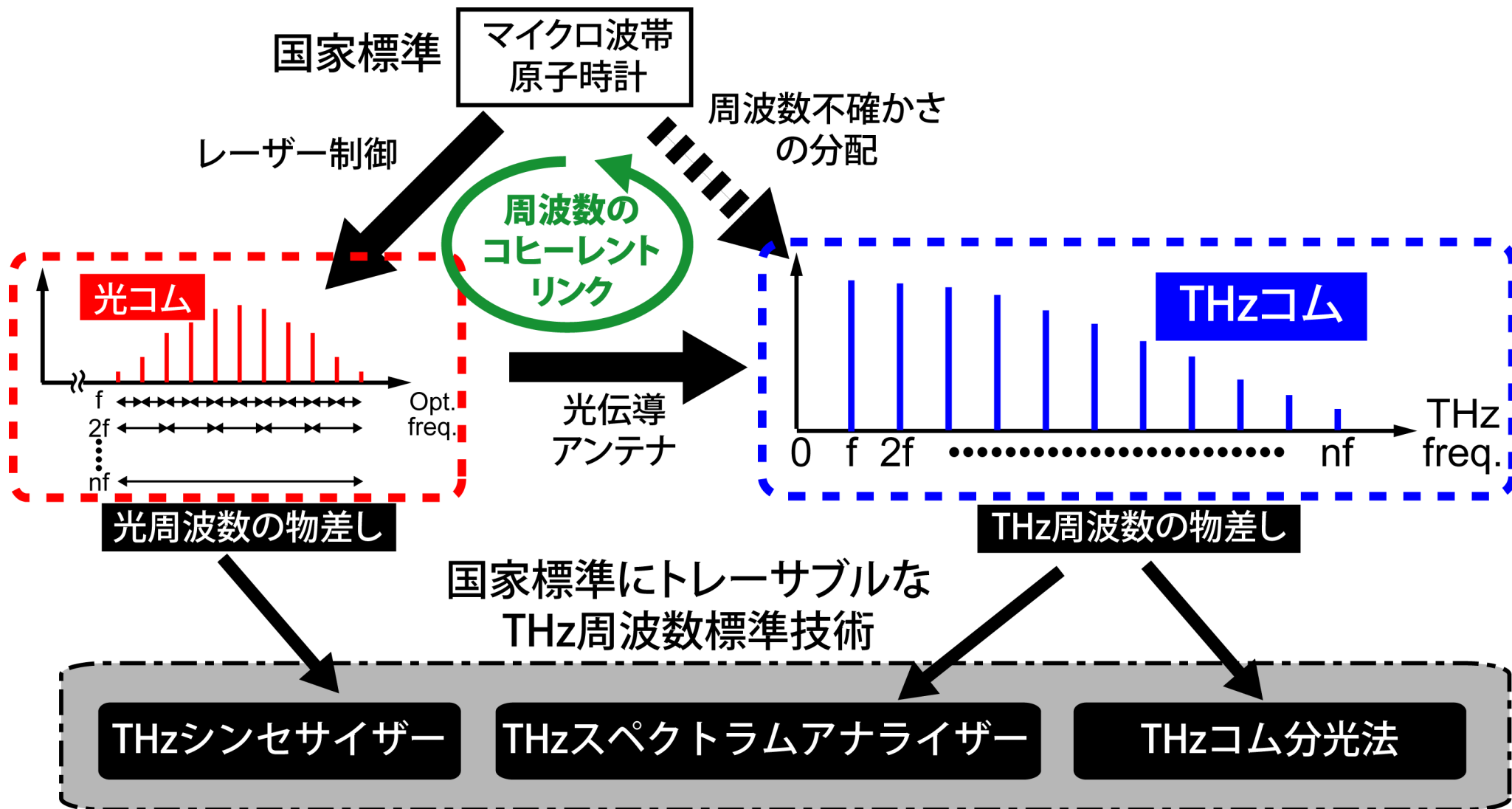


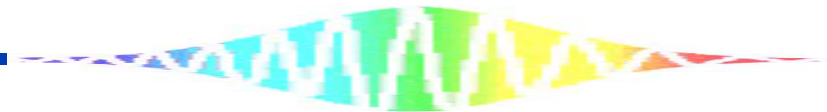
光領域やTHz領域における超精密周波数ものさし

(数万～数十万本に及ぶ狭線幅CWレーザー光が等間隔で並んだ集合体)

(単純性, 広帯域選択性, 高スペクトル純度, 周波数逡倍性)

コヒーレント周波数リンクに基づいた THz周波数トレーサビリティ





①THzコム分光法

～THzの目盛でスペクトルを
読み取る～

どうやって、THzコムを観測するか？

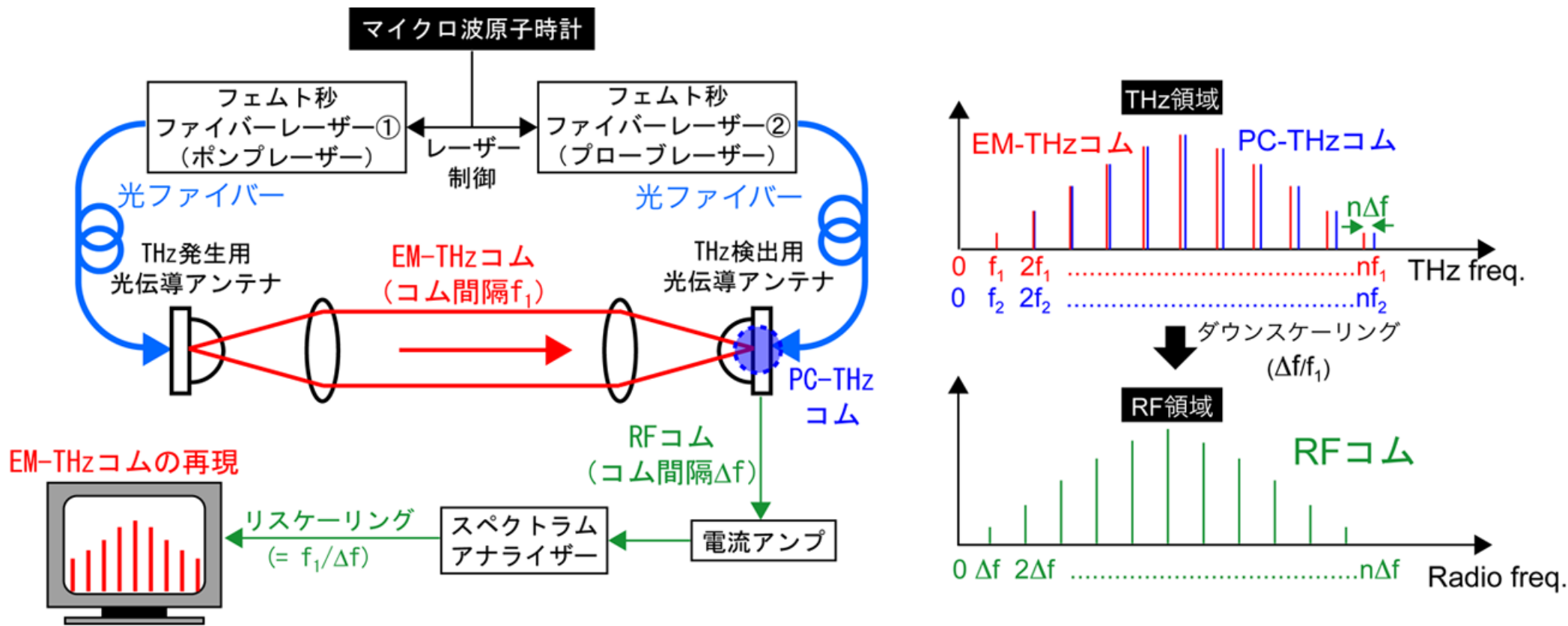
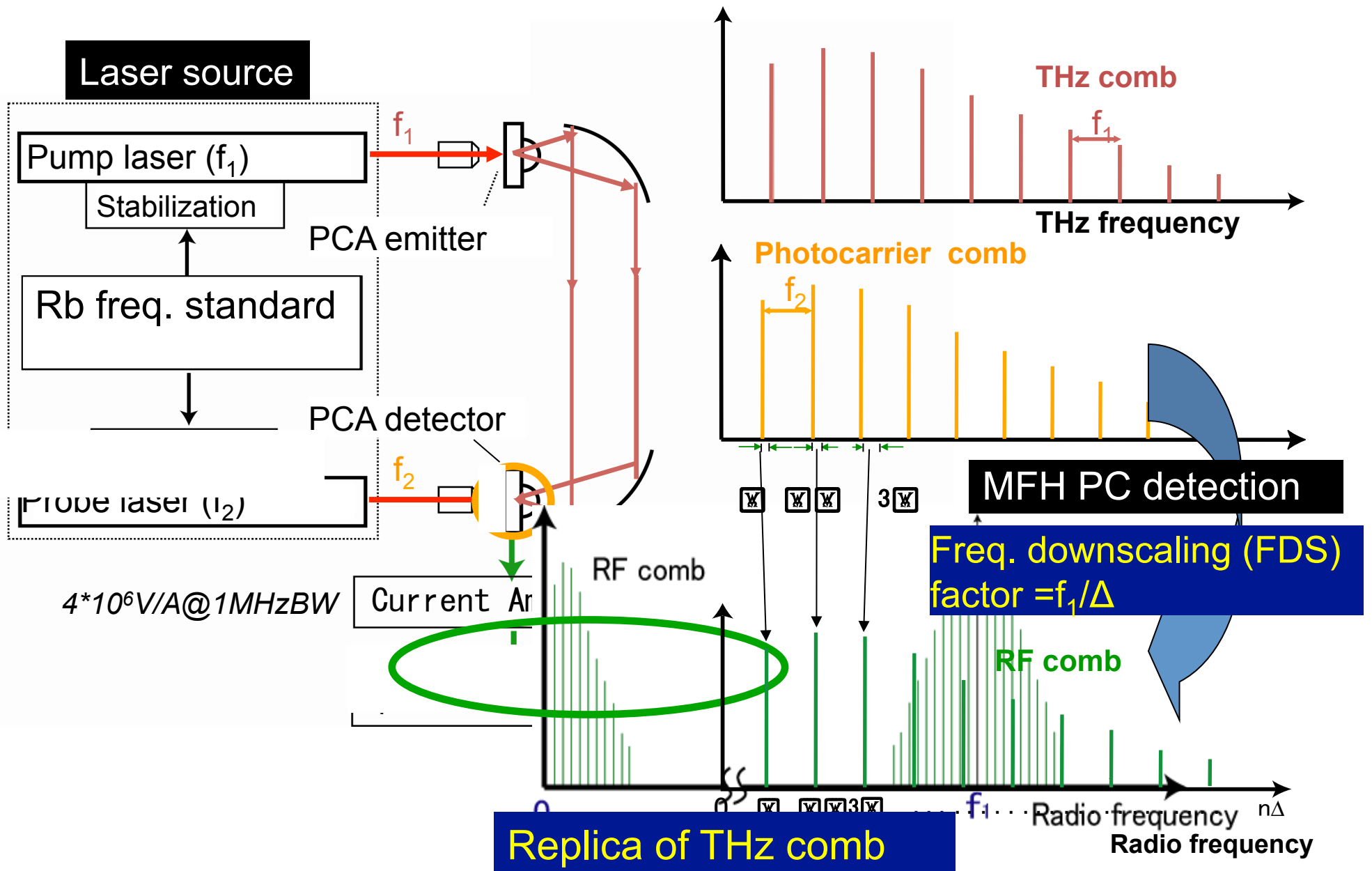
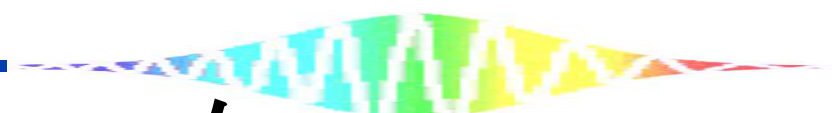


図2 多周波ヘテロダイン光伝導検出を用いたTHzコム分光法

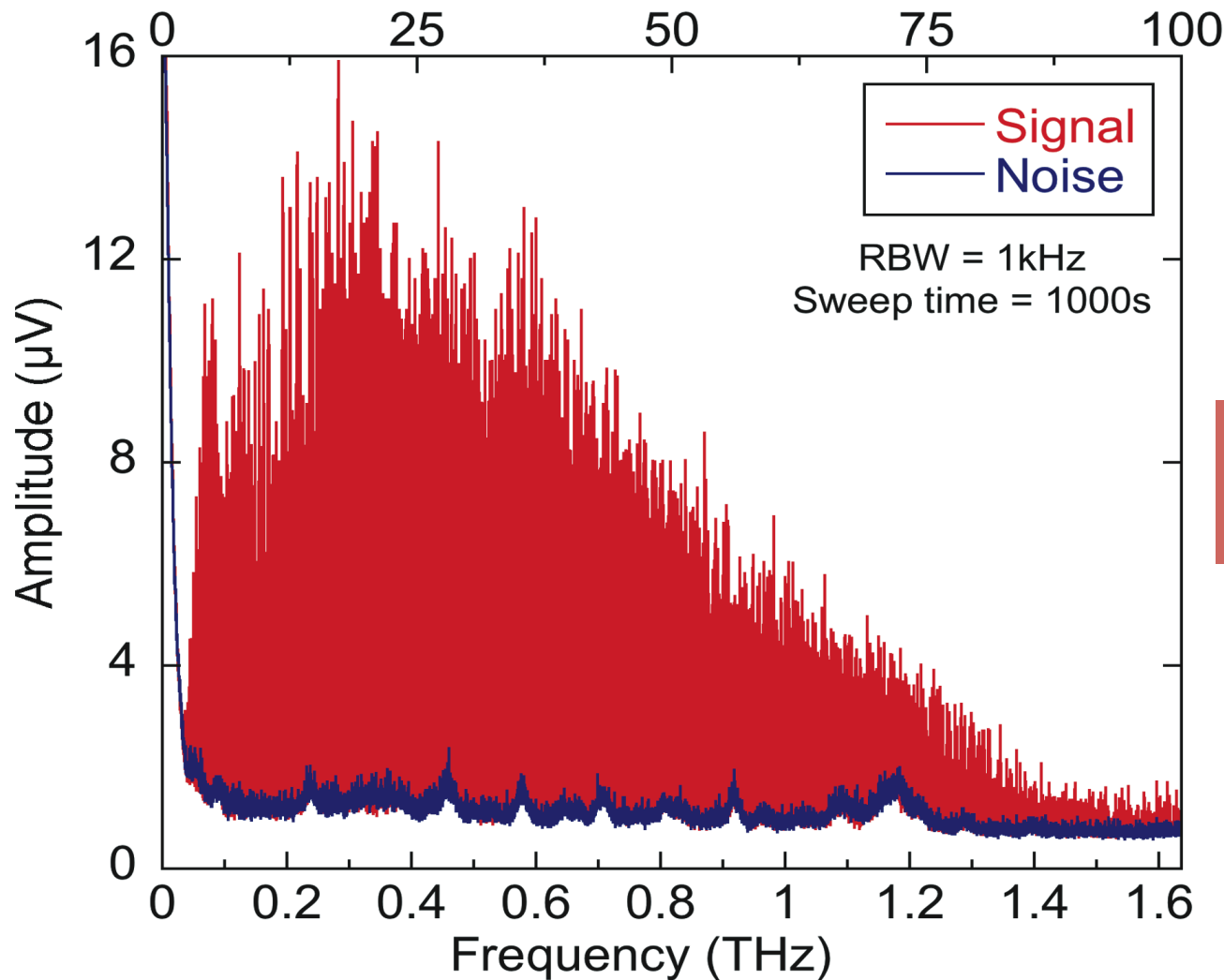
Multi-frequency-heterodyning photoconductive detection





RFコムとTHzコム

Frequency on RF spectrum analyzer (kHz)

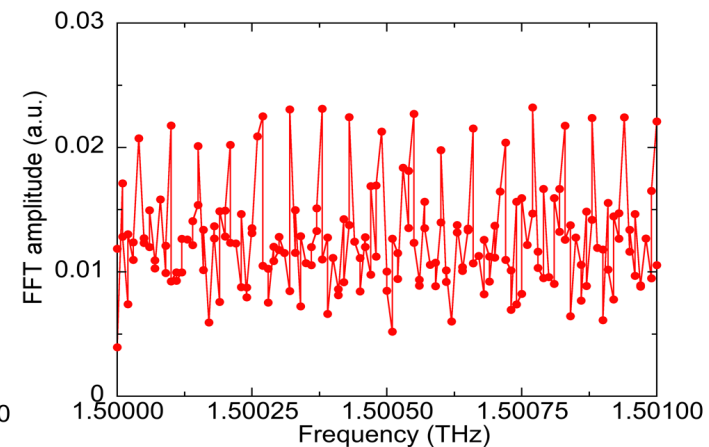
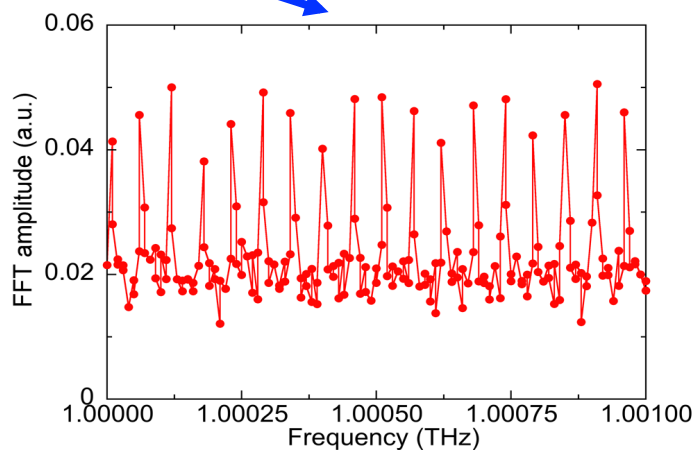
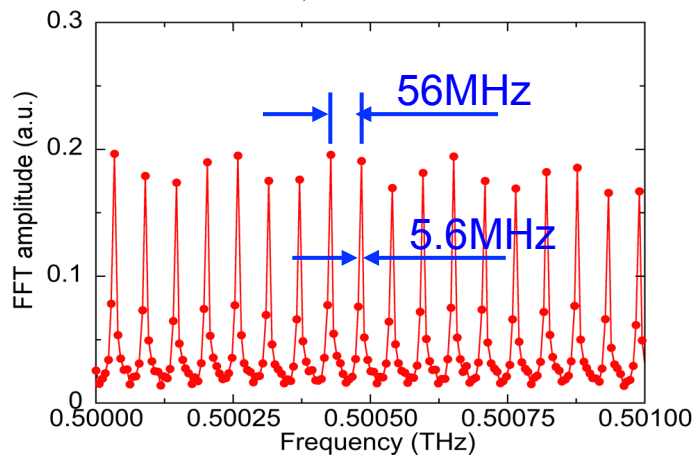
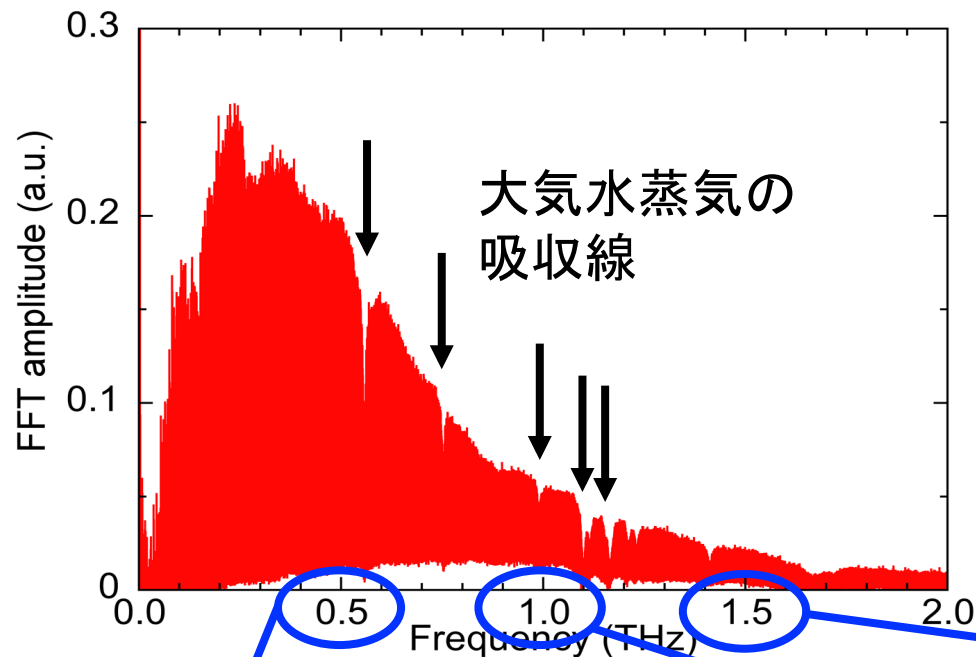


リスケーリング
($\times f_1 / \left[\frac{\text{dB}}{\text{Hz}} \right]$)

原理確認実験

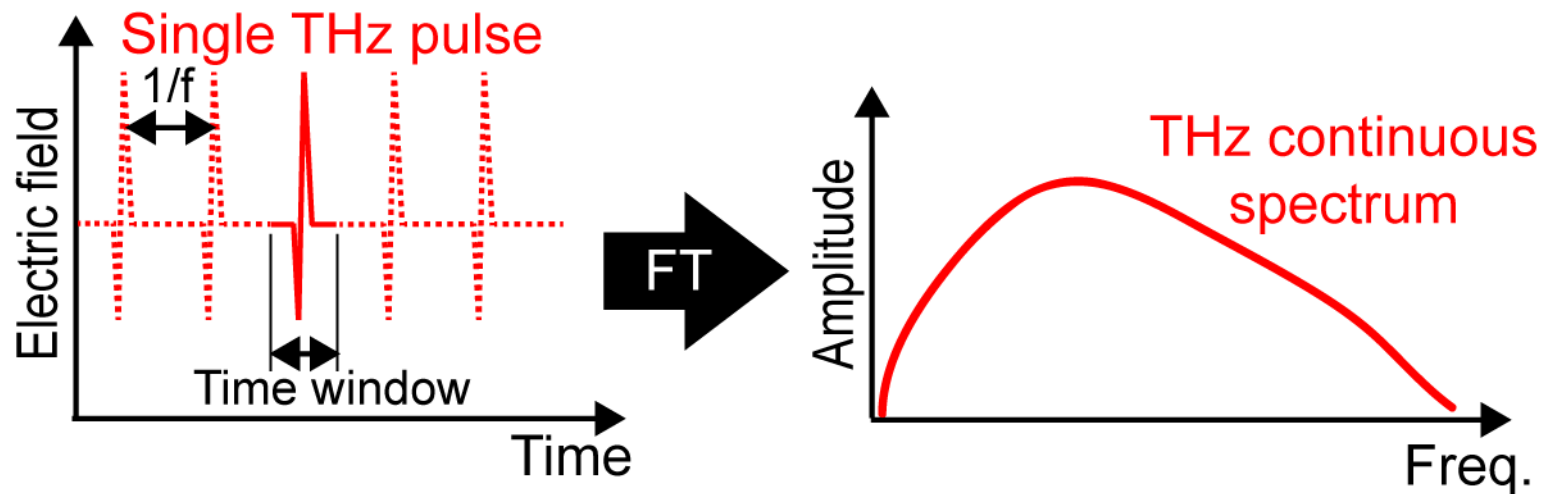
コム・モード分解スペクトルの観測に成功@世界初

周波数物差しの長さ=2THz
目盛り間隔=56.1MHz
目盛り幅=5.6MHz

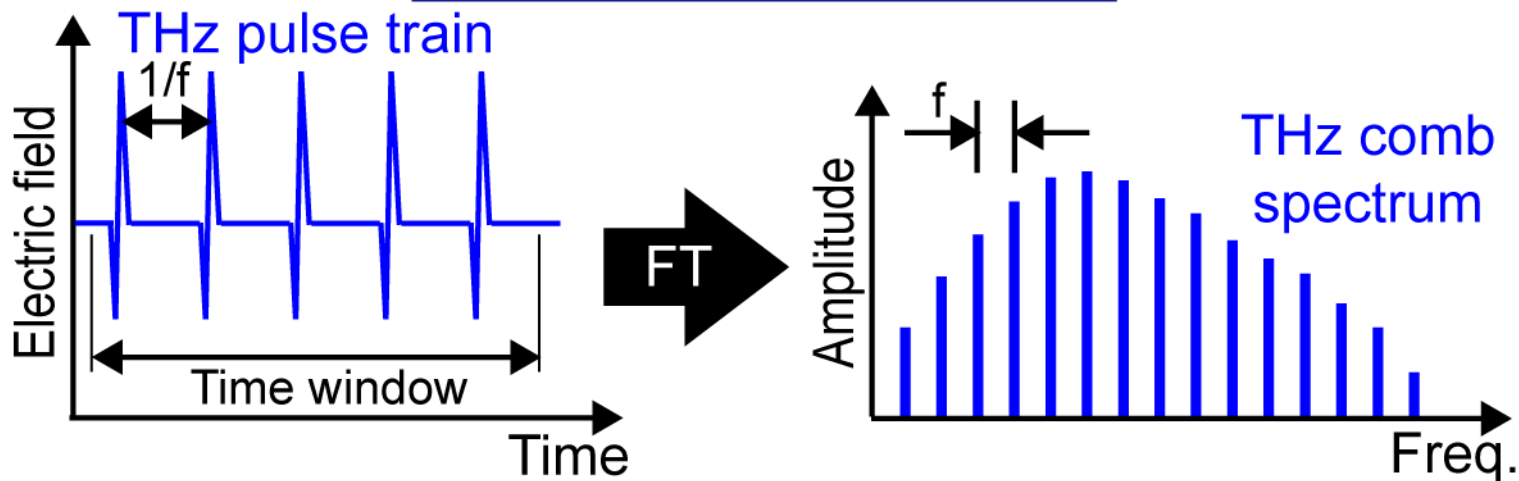


どうやって、THzコムを観測するか？

従来THz-TDS (機械式時間遅延走査)



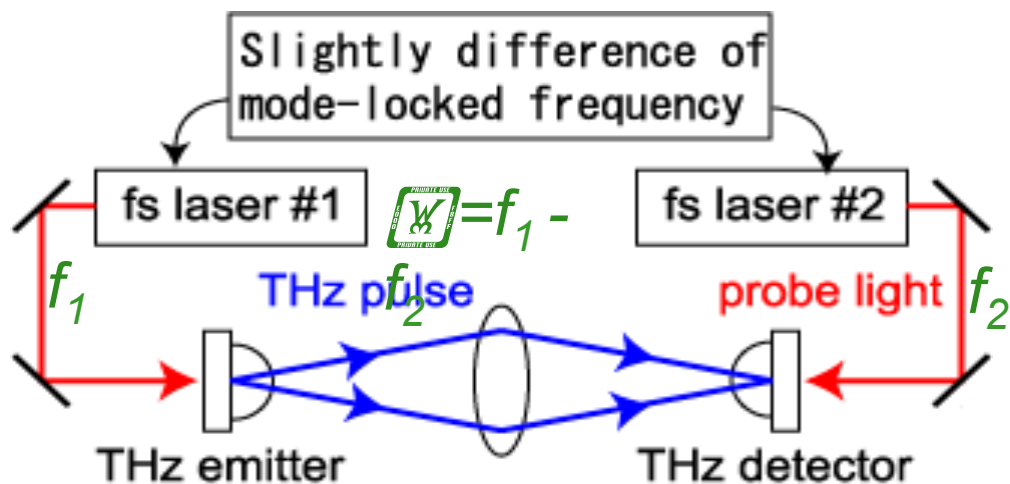
時間窓拡大式THz-TDS



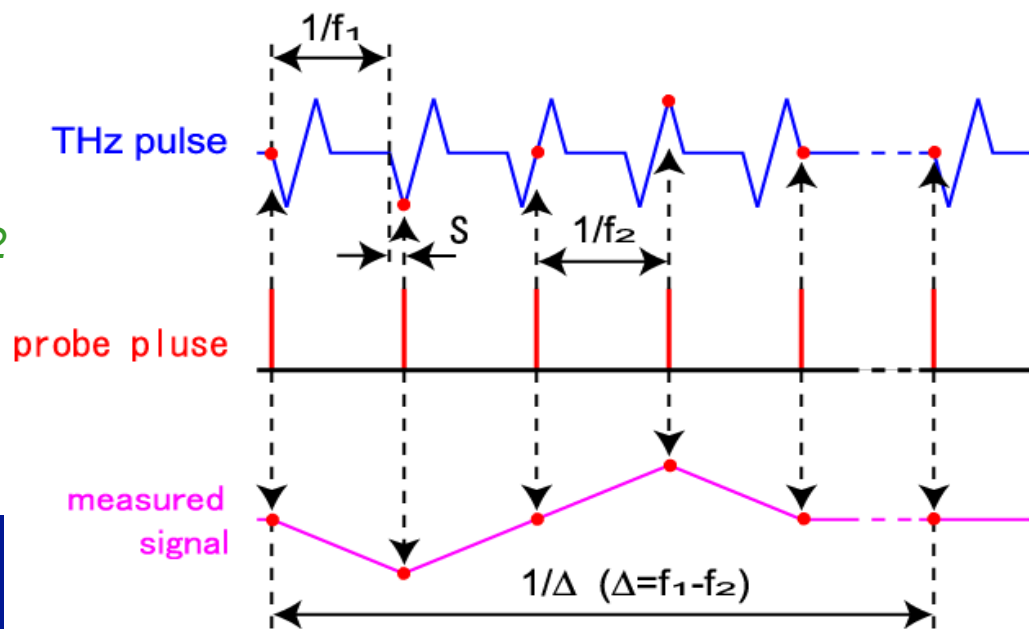
非同期光サンプリング式THz-TDS(ASOPS-THz-TDS)

ref) T. Yasui et al., Appl. Phys. Lett. 87, 061101 (2005).

特許4565198&米国特許7605371



THzパルスとプローブパルスの
重なるタイミングが各パルス
毎に自動的にシフト



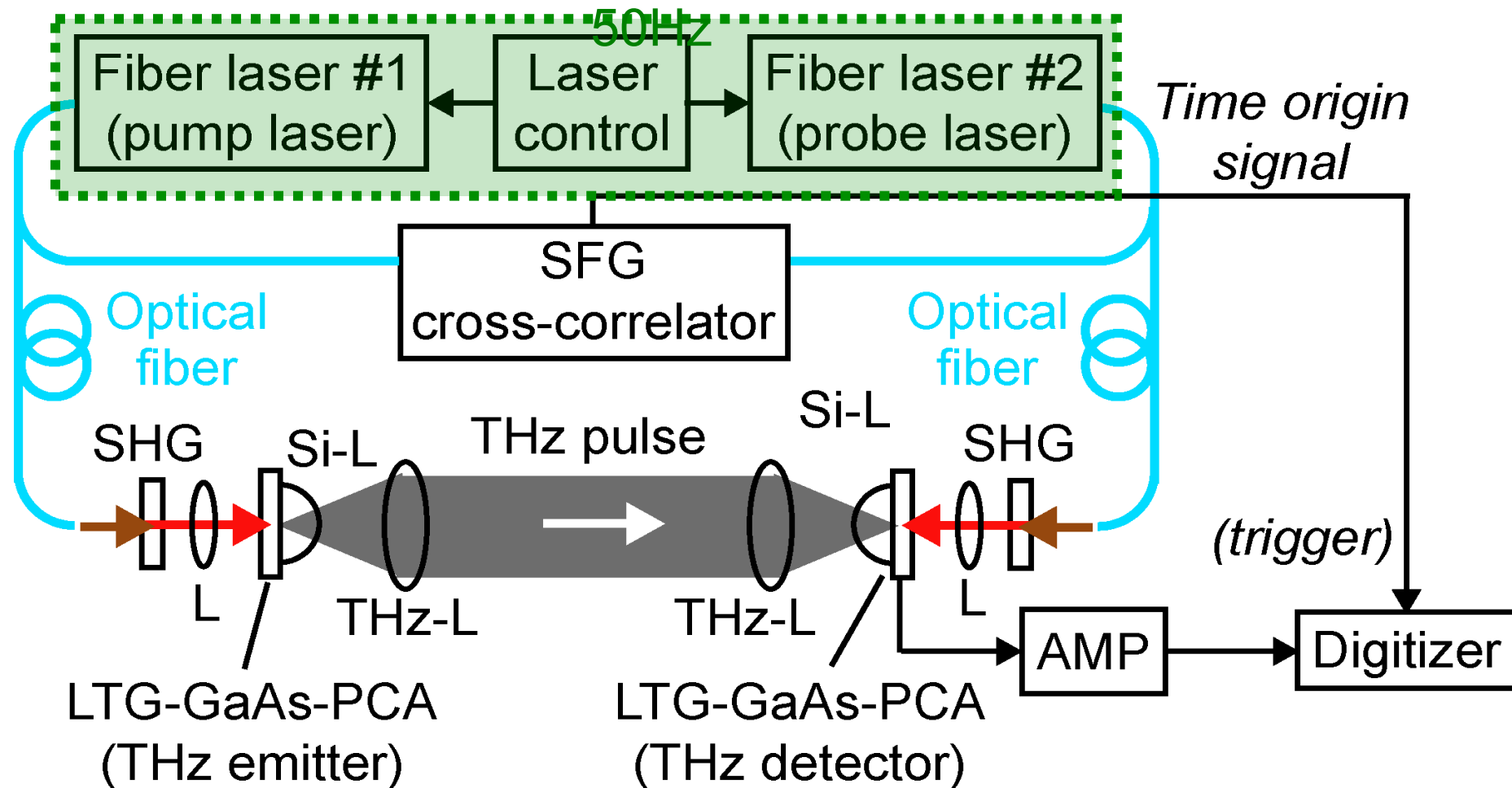
- ・ 機械式時間遅延走査が不要
- ・ 高速測定(スキャンレート $\sim 10^6$)
- ・ 任意の測定時間窓を設定可能
- ・ スペクトル確度はモード同期周波数の安定性に依存

ピコ秒オーダー (周期 $1/f_1$) のTHzパルスをマイクロ秒オーダー (周期 $1/\Delta$) までスケール拡大 (時間スケール拡大率 $= f_1/\Delta$)

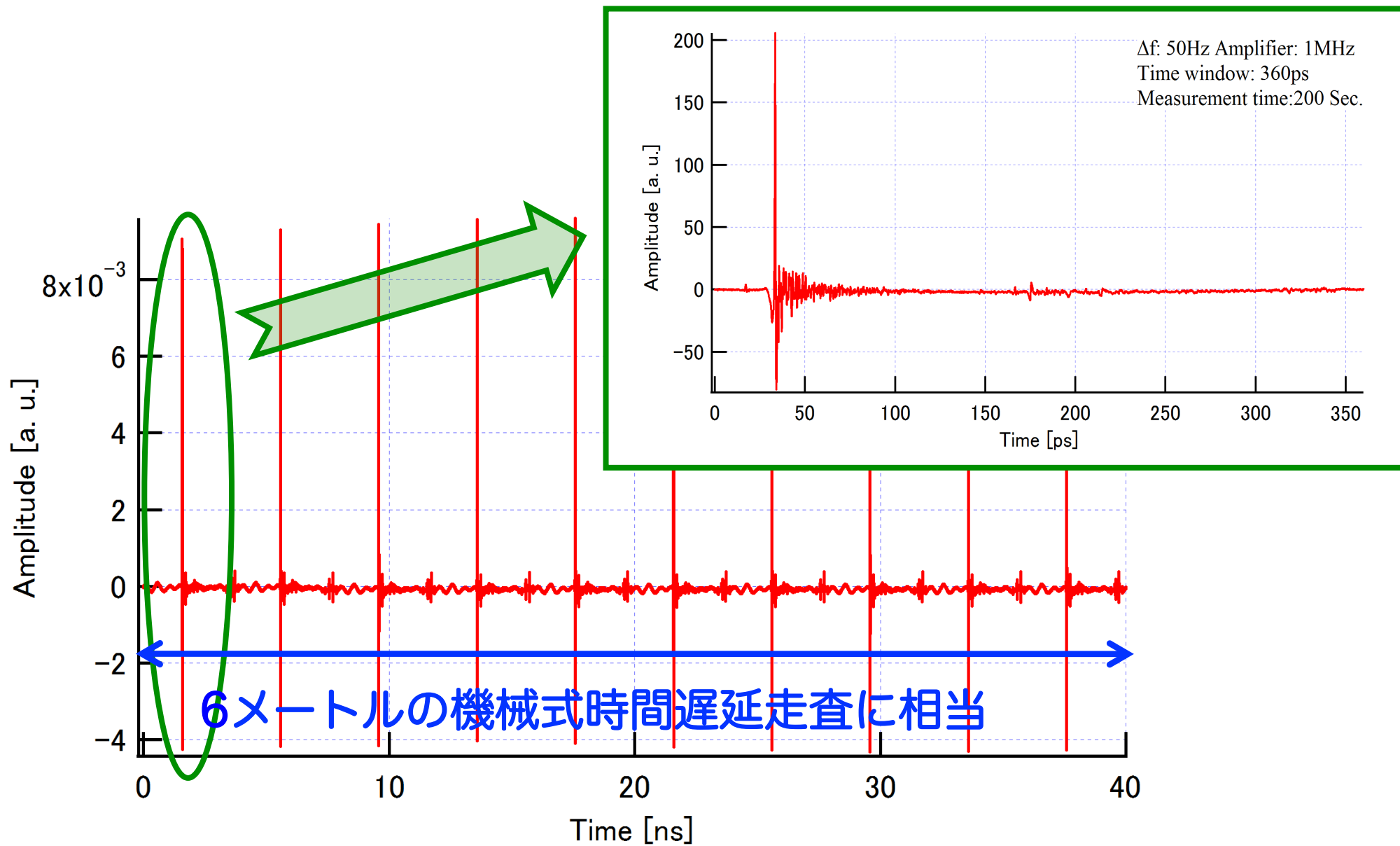
実験装置

$\lambda_c = 1550\text{nm}$, $\Delta t = 50\text{fs}$, $P = 500\text{mW}$

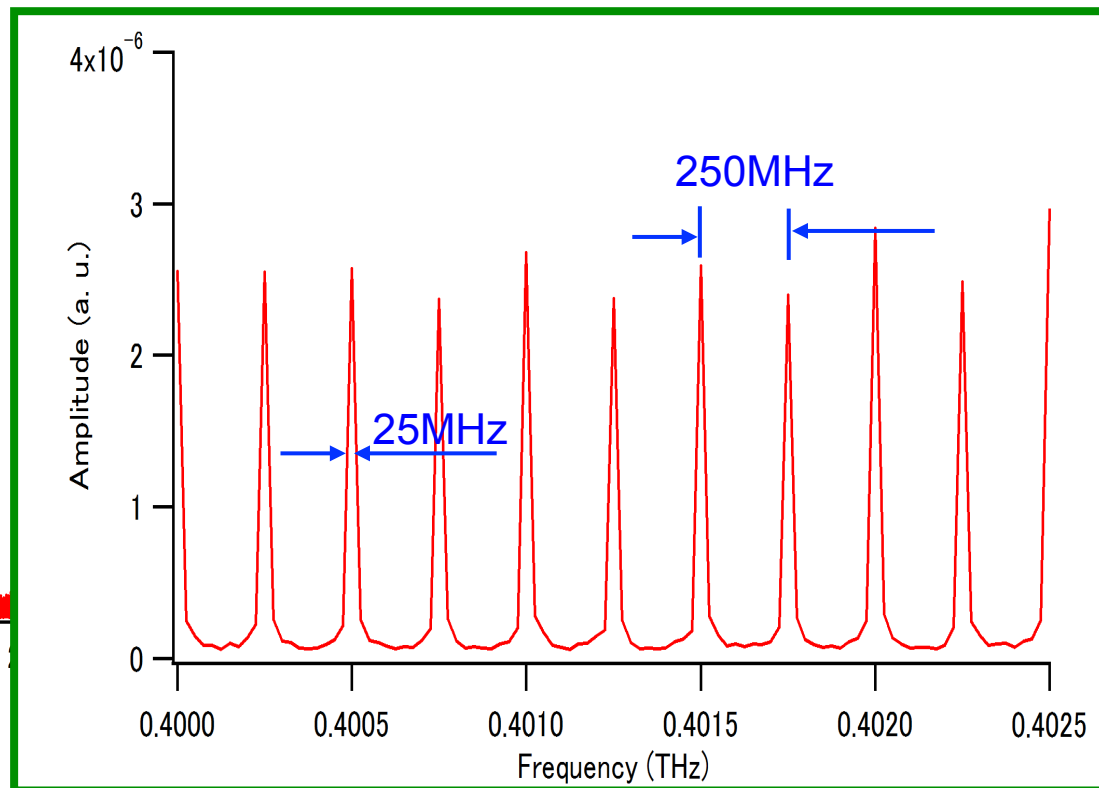
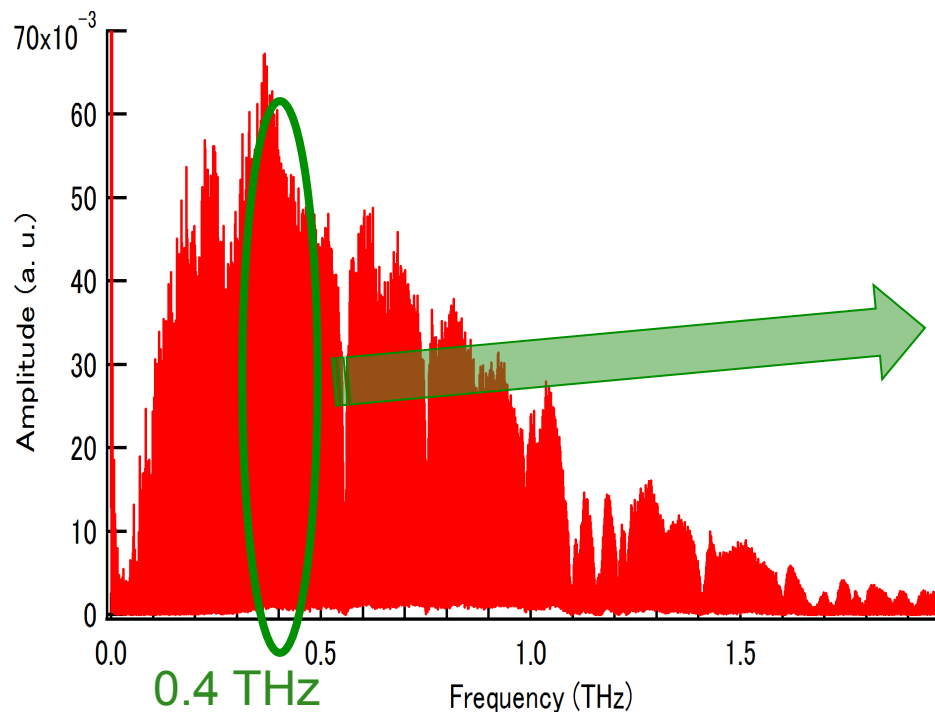
$f_1 = 250.000049\text{MHz}$, $f_2 = 249.999999\text{MHz}$, $\Delta f = f_1 - f_2 = 50\text{Hz}$



10連THzパルス列の電場時間波形



THzコム・モードの拡大スペクトル



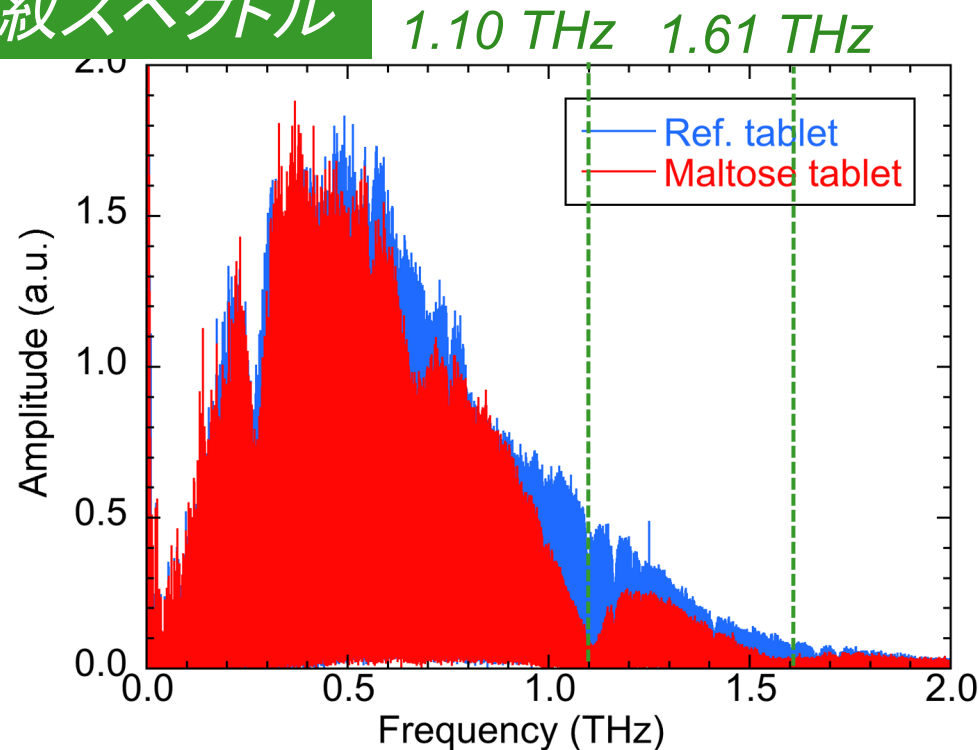
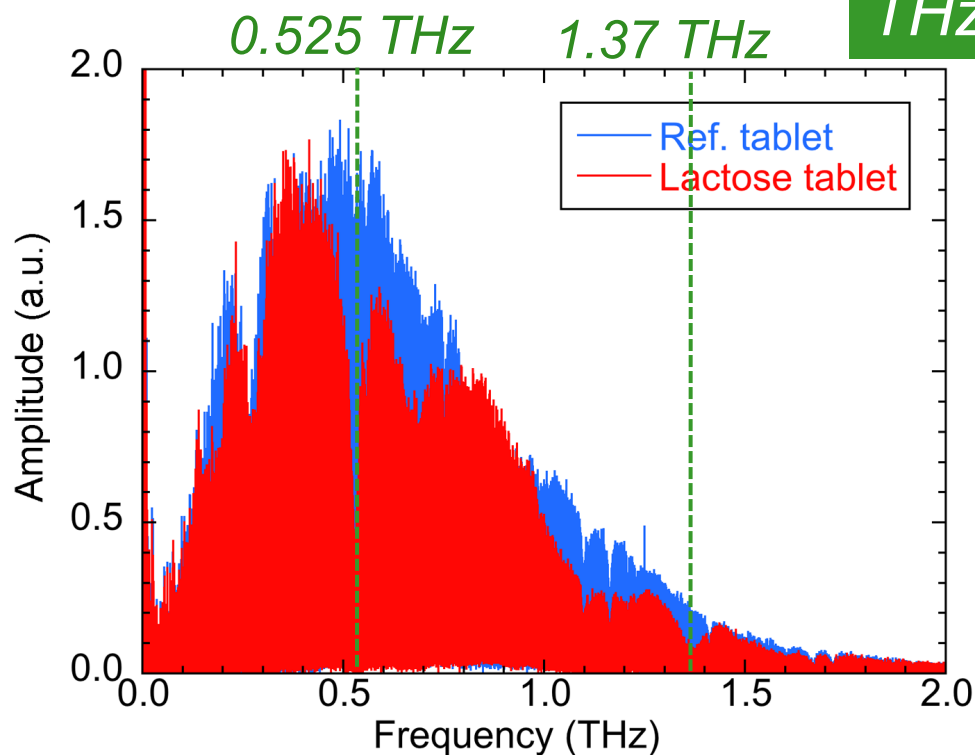
コム・モード間隔 = 250MHz = モード同期周波数
コム・モード線幅 = 25 MHz = 時間窓(40ns)の逆数

糖類サンプルの計測

ラクトース錠剤 (濃度25%)

マルトース錠剤 (濃度25%)

THz指紋スペクトル

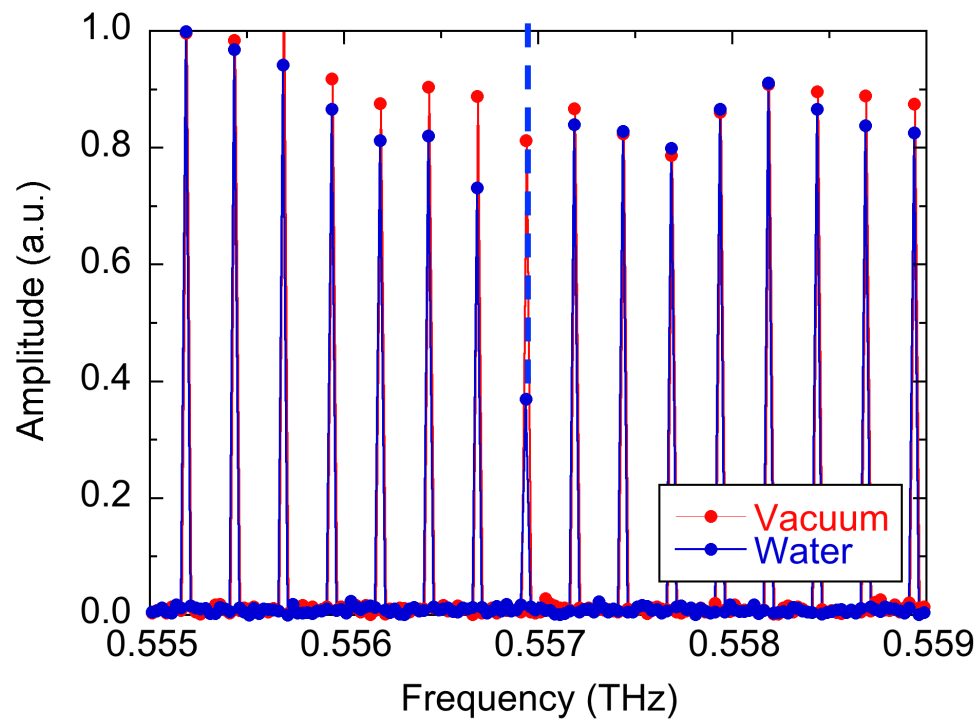
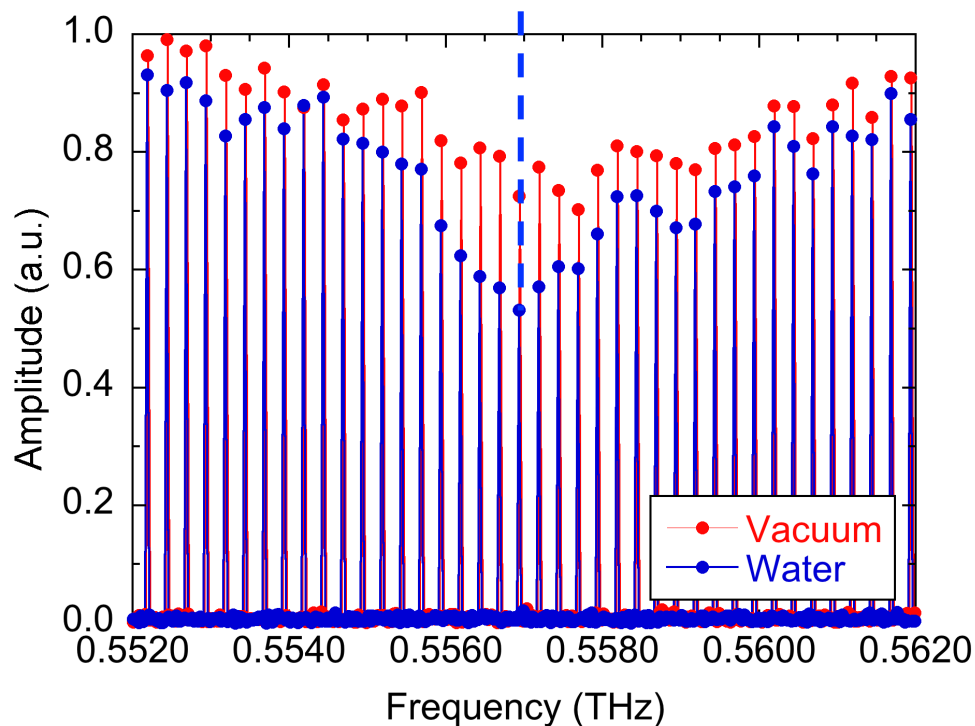


THzコム・モードをスペクトルの
周波数マーカーとして使うなら



スペクトル分解能=モード同期周波数
=250MHz

a



ギャップレスTHzコム (THzコムの走査)

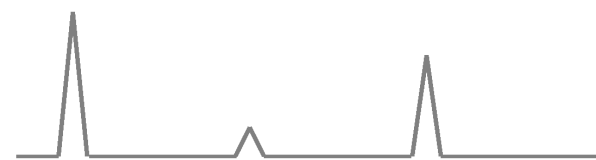
THzコム分光法では、コムが離散的に分布してるので、スペクトル分解能はコム間隔になる。

コム線幅 \ll コム間隔

コム・モードを高精度に少しずつ横ずらししながらコム・モード間のギャップを補間する

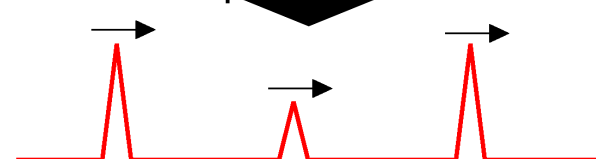
スペクトル分解能をコムモードの線幅まで、向上できる！

Comb-mode position #1



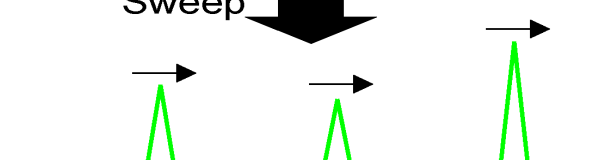
Sweep

Comb-mode position #2



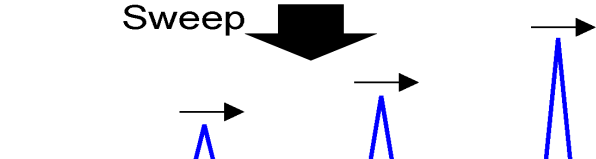
Sweep

Comb-mode position #3



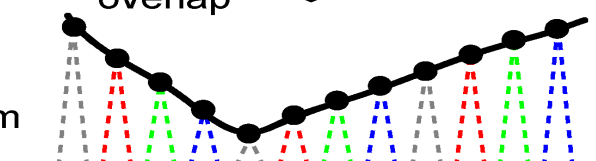
Sweep

Comb-mode position #4



Spectral overlap

Interpolated THz comb spectrum



低圧水蒸気の分光計測①

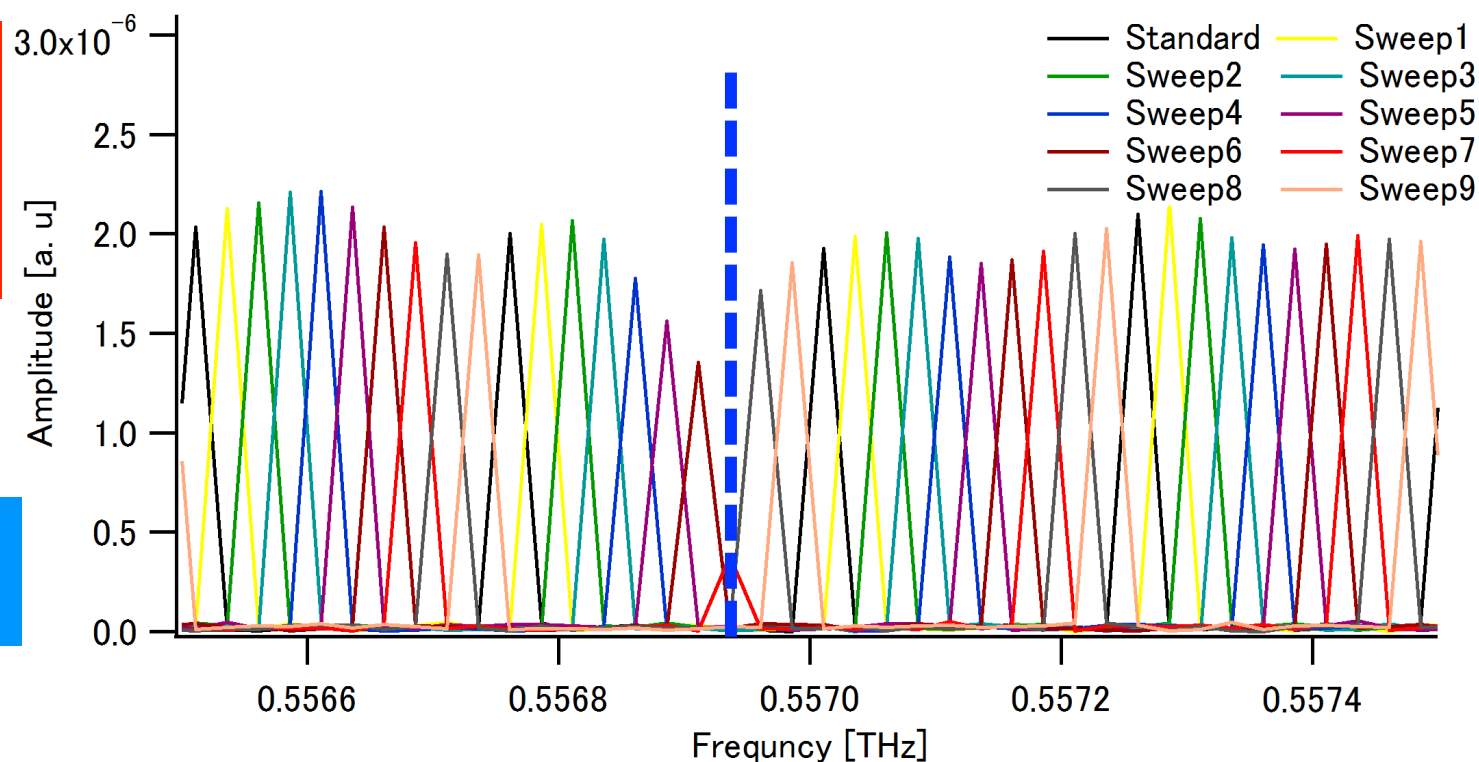
回転遷移 $1_{10} \leftarrow 1_{01}$: 0.5569360THz@NASA database
(圧力拡がり線幅= 23 MHz @H₂O:10Pa&N₂:320Pa)

振幅スペクトル (10周期ギャップレスTHzコム)

走査前
 $f_1=250,000,049$ Hz
 $f_2=250,000,099$ Hz
 $\Delta f=50$ Hz

$\Delta f_1, \Delta f_2$
+15,625 Hz

ステップ走査を10回
繰り返す

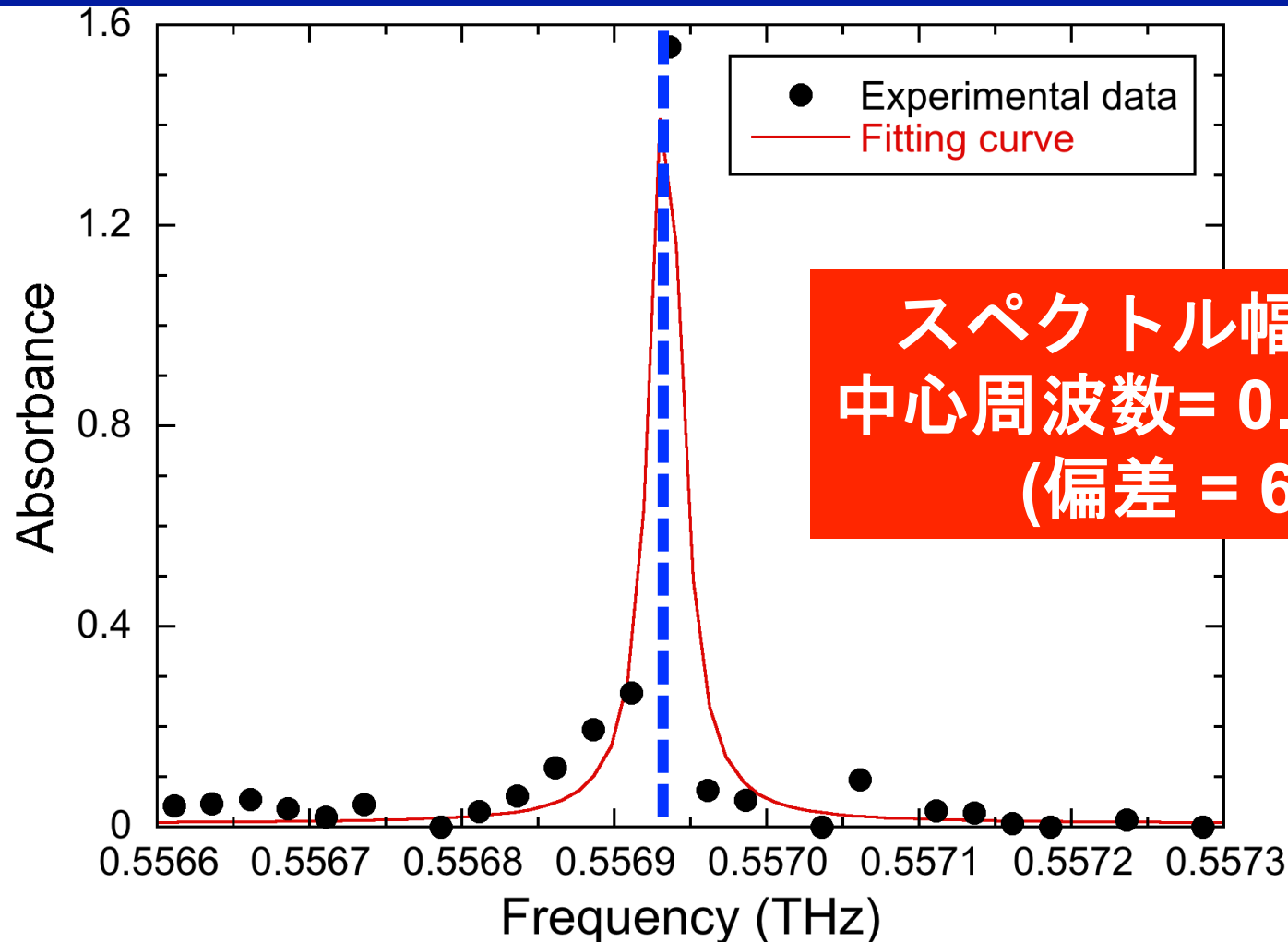


THzコムをギャップレス化

低圧水蒸気分光計測②

回転遷移 $1_{10} \rightarrow 1_{01}$: 0.5569360 THz @ NASA database
(圧力広がり線幅 = 23 MHz @ H_2O : 10 Pa & N_2 : 320 Pa)

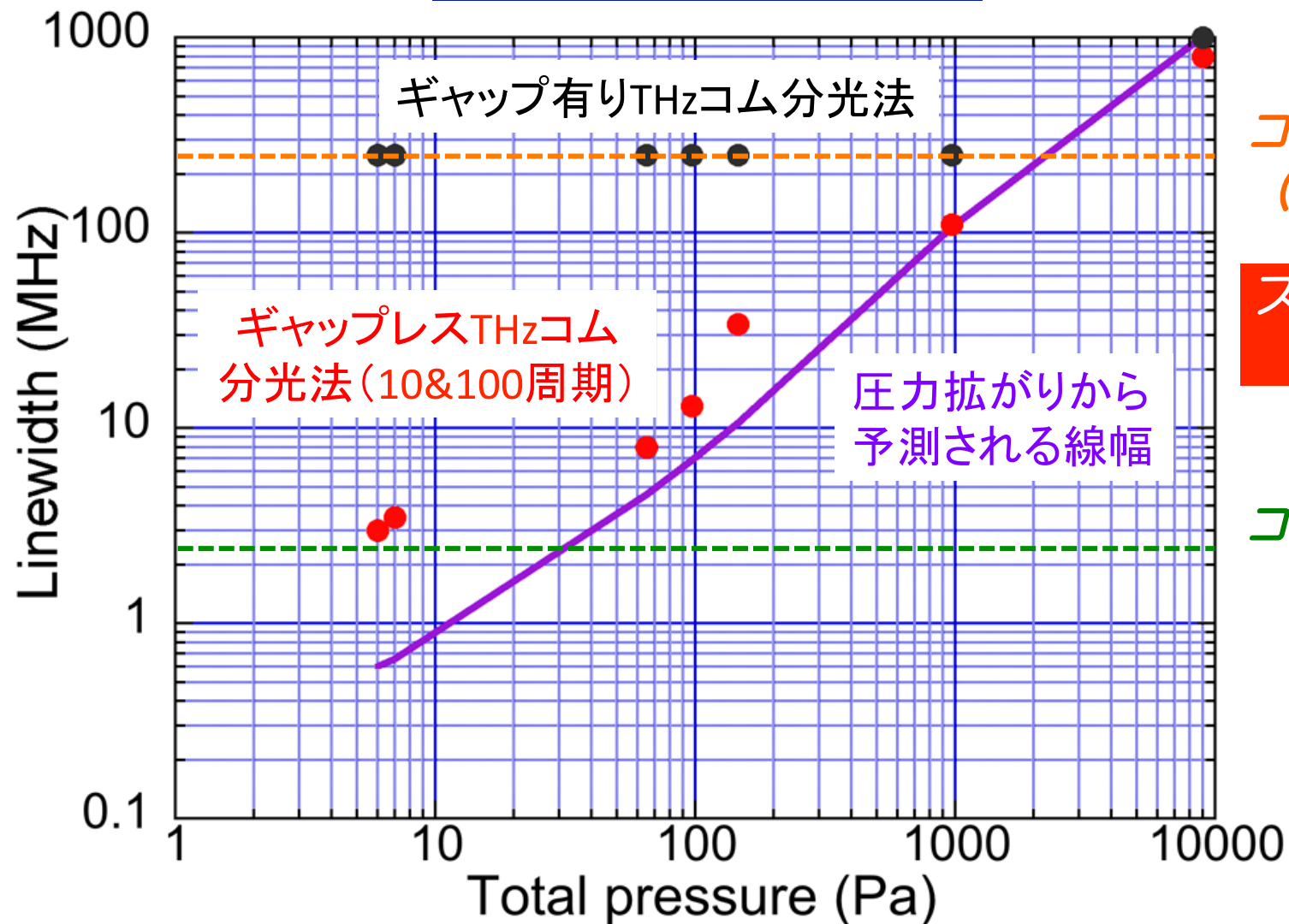
吸収スペクトル (10周期ギャップレスTHzコム)



スペクトル幅 = 24 MHz
中心周波数 = 0.556930 THz
(偏差 = 6 MHz)

低圧水蒸気分光計測③

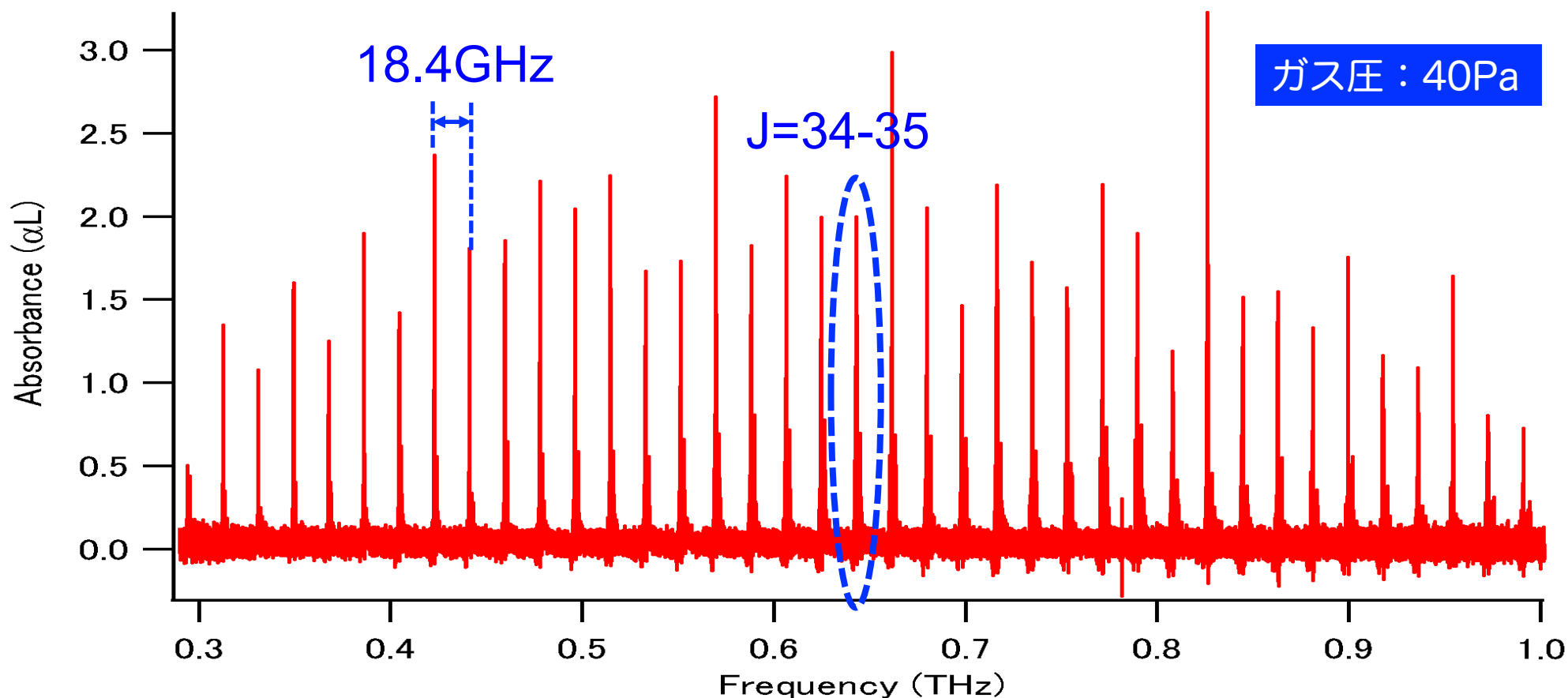
圧力拡がり特性



低圧アセトニトリル (CH₃CN) の分光計測①

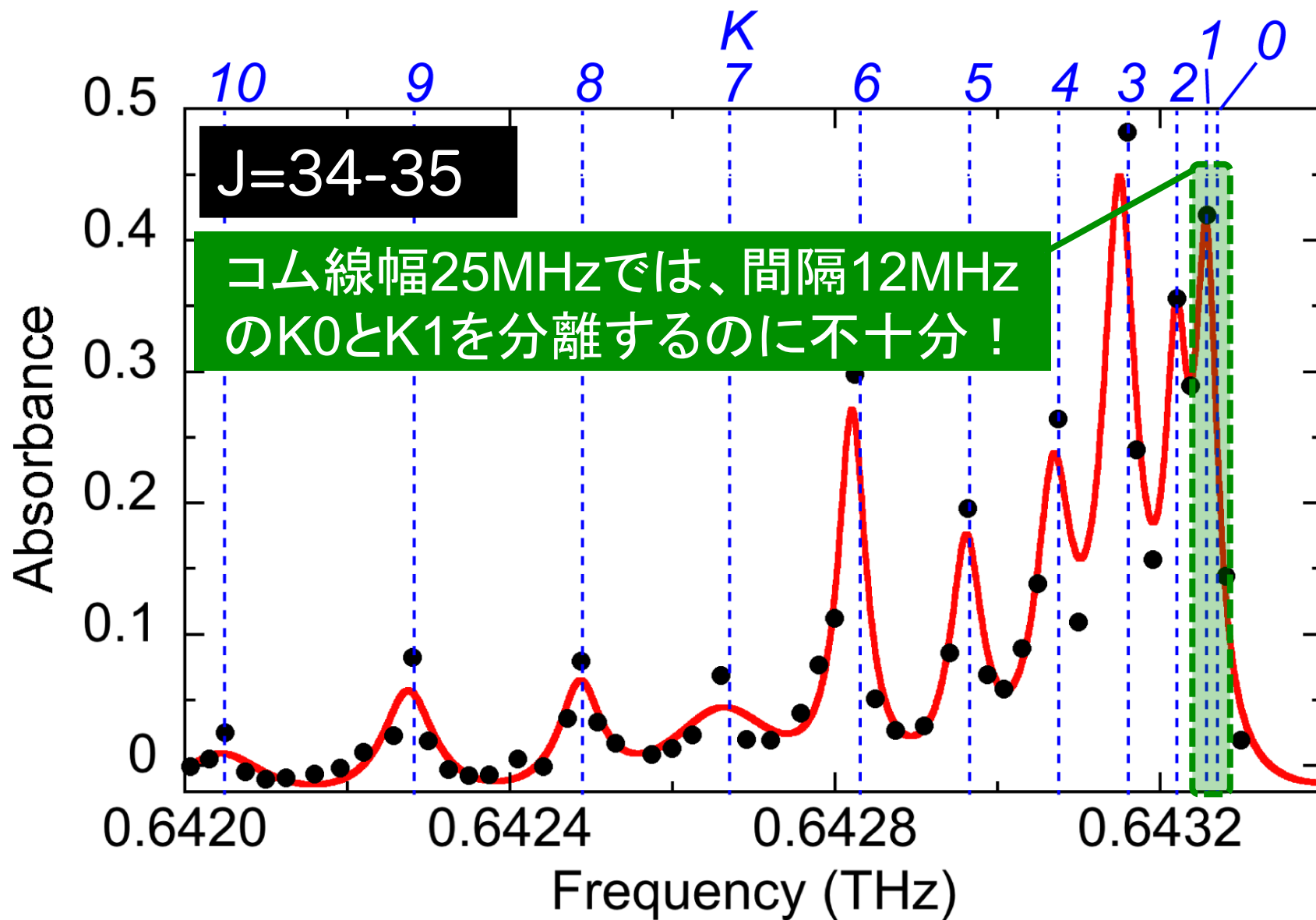
- 対称コマ型分子, 回転定数 $B = 9.2$ GHz
- $2B (= 18.4 \text{ GHz})$ 間隔で回転遷移群 ($J = 15 \sim 53$)

吸収スペクトル (10周期THzコム)



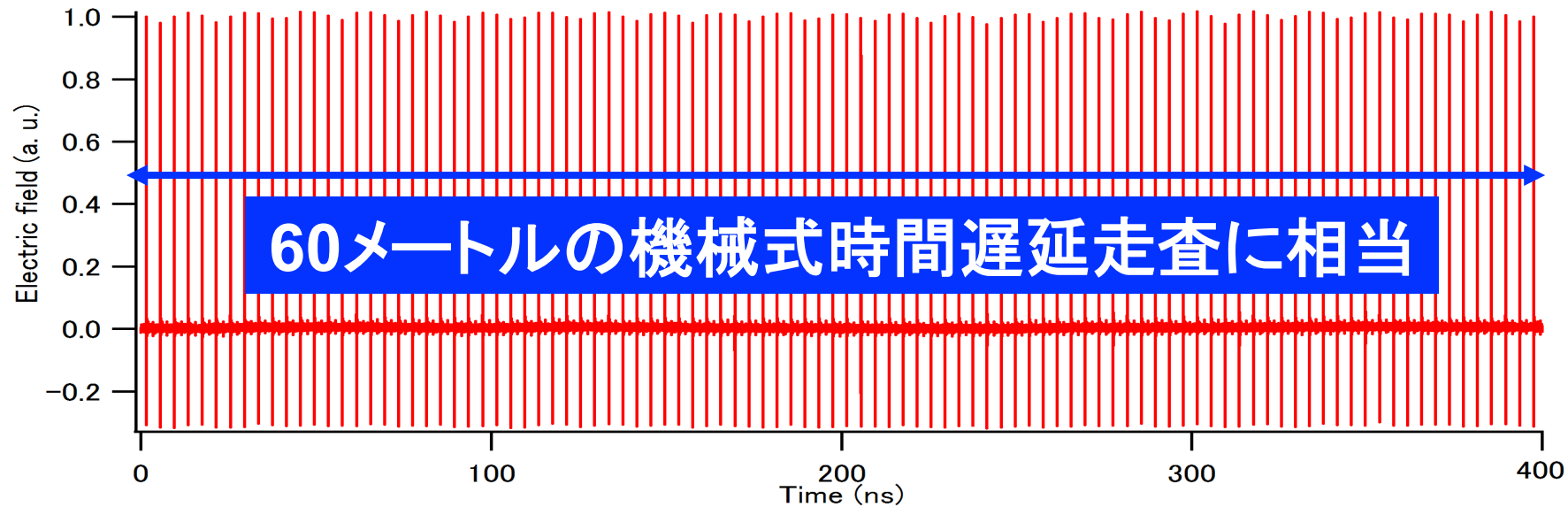
低圧アセトニトリル (CH₃CN) の分光計測②

吸収スペクトル (10周期ギャップレスTHzコム)

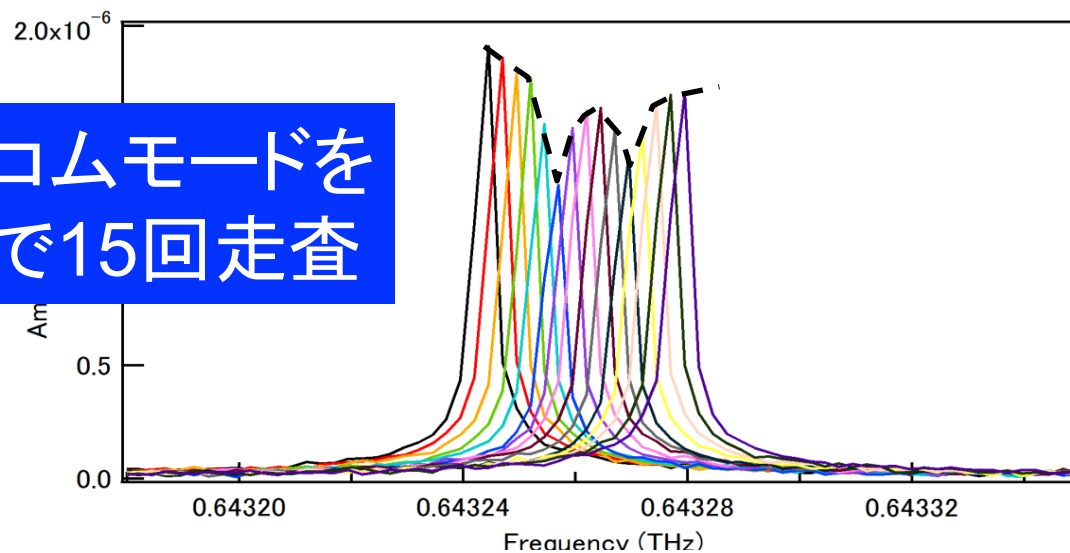


低圧アセトニトリル (CH₃CN) の分光計測③

吸収スペクトル (100周期ギャップレスTHzコム)

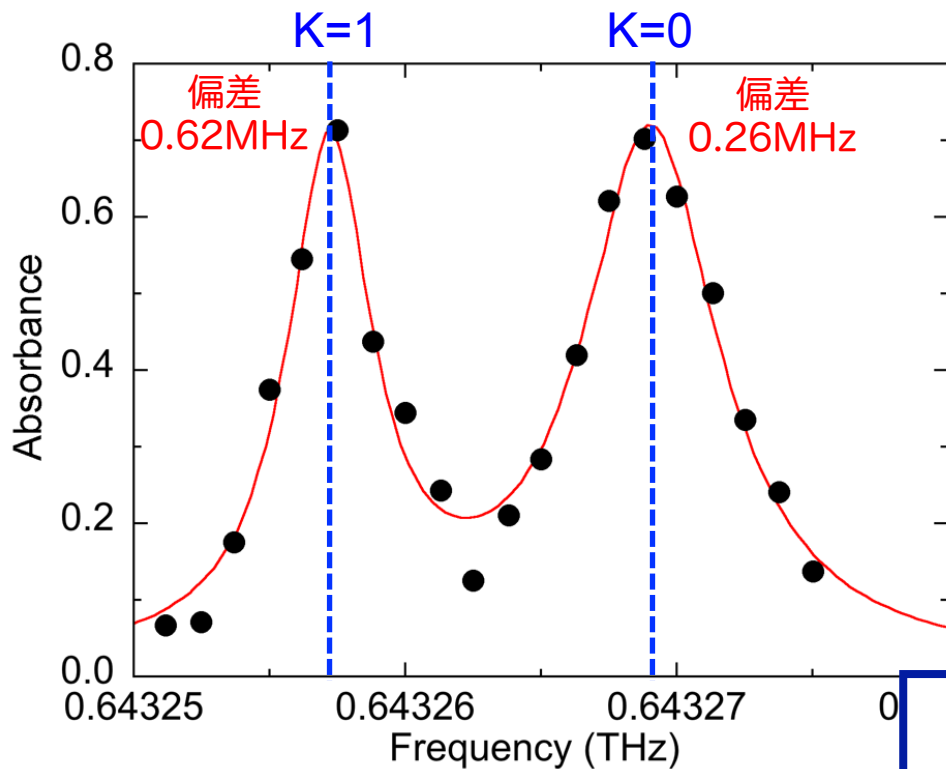


2.5MHz線幅コムモードを
2.5MHz間隔で15回走査



低圧アセトニトリル (CH₃CN) の分光計測③

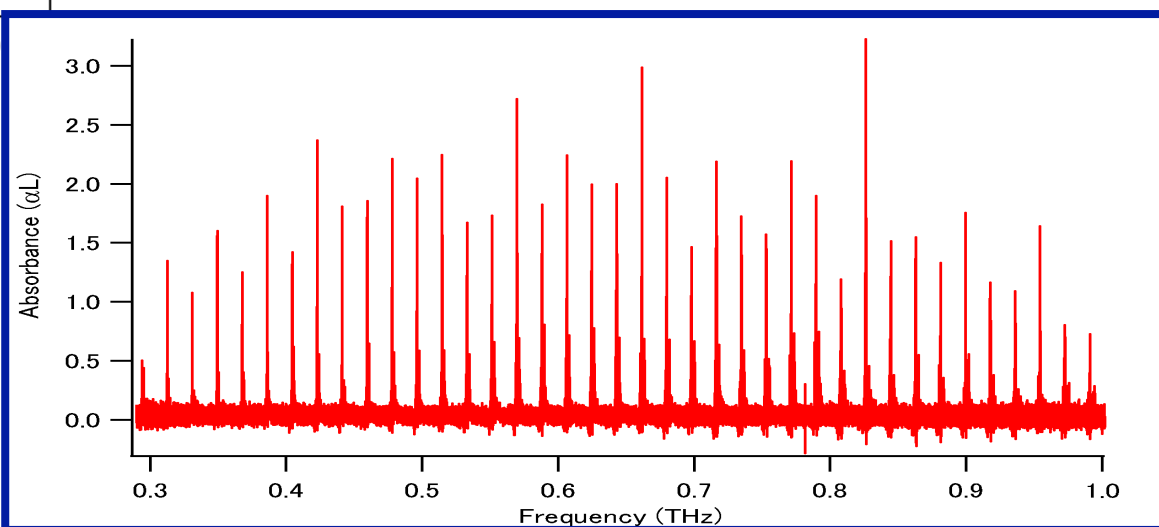
吸収スペクトル (100周期ギャップレスTHzコム)

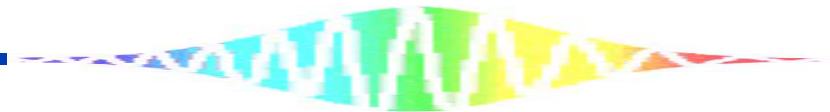


NASAデータベースとの偏差
1MHz以下(スペクトル確度 $<10^{-6}$)

↓
データベースの高精度化

極めて周波数ダイナミック
レンジ (不確かさ
1MHz@周波数1THz) の
広い分光計測を実現

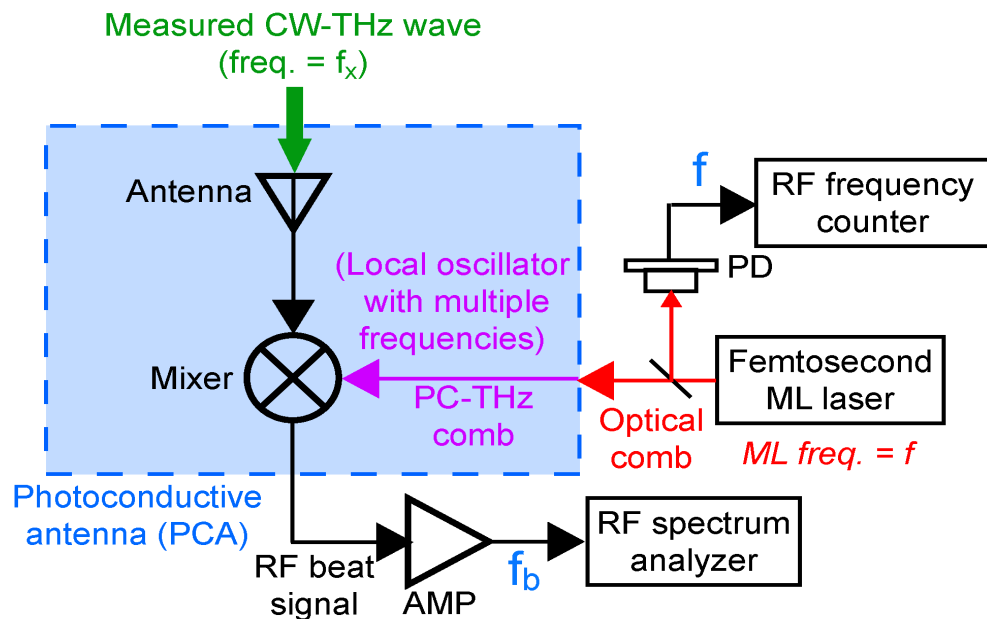




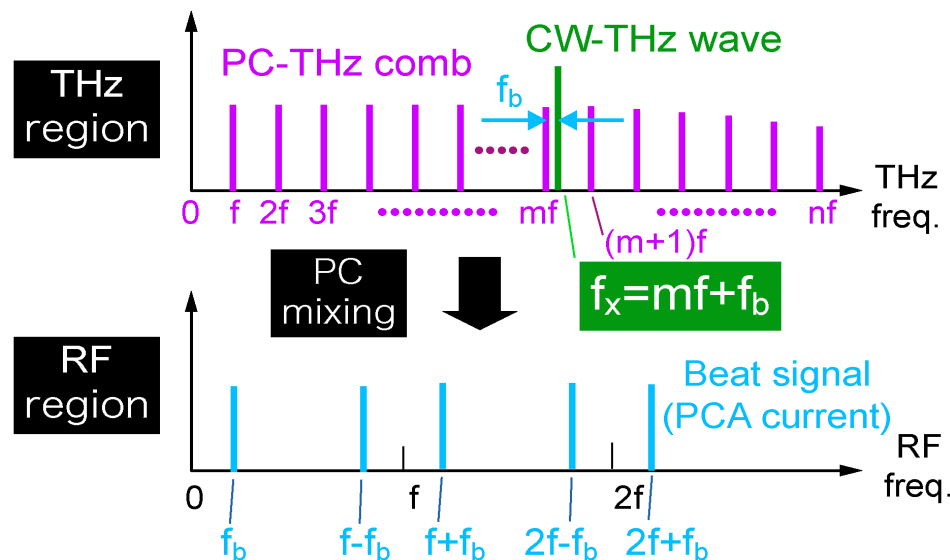
②THzスペクトラム アナライザー

～THzの周波数目盛で読む～

光伝導ミキシング



Freq. domain

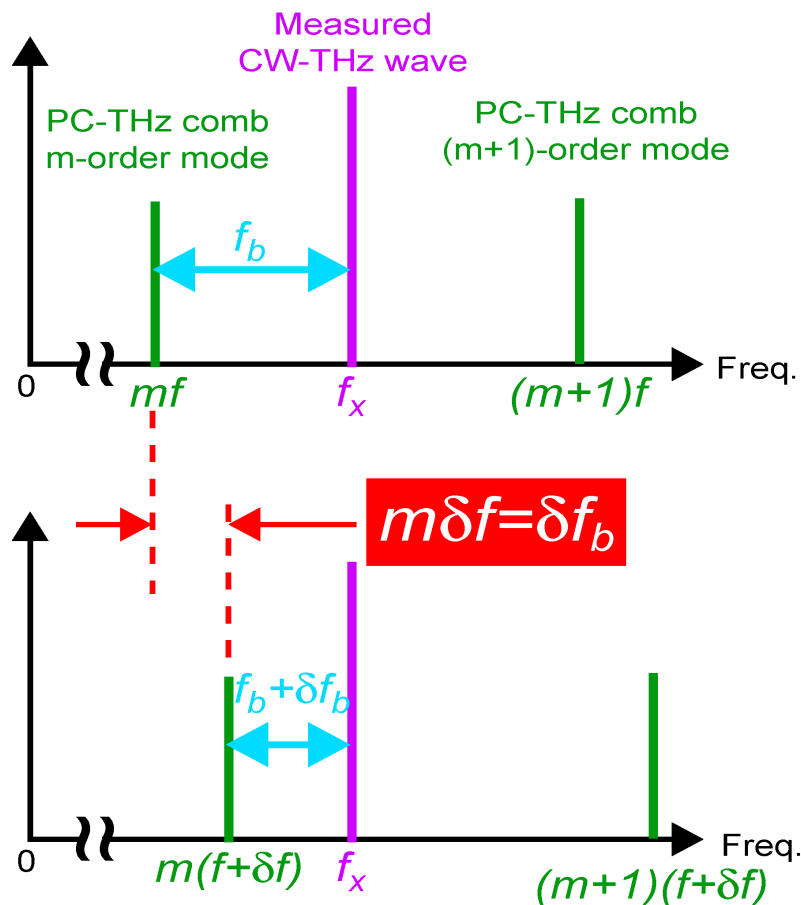


- ①PCAを「テラヘルツ」インジケータとして利用することにより、室温環境における高感度検出を実現
- ②PC-THzコムを局部発振器として利用することにより、1台でTHz領域をフルカバー

$$f_x = mf \pm f_b$$

m : 最隣接コムモード次数
 f : モード同期周波数
 f_b : ビート周波数

PC-THzコムモード次数の決定



Shift of ML freq. by

$$\frac{\Delta f}{f}$$

$$m = \frac{|\delta f_b|}{|\delta f|}$$

Change of beat freq. by

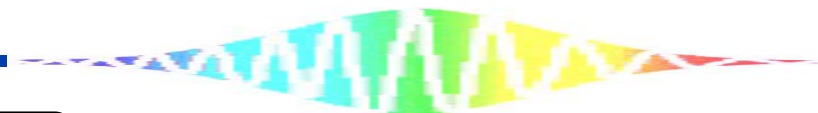
$$\frac{\Delta f_b}{f_b}$$

$$f_x = mf - f_b$$

$$(\delta f_b / \delta f > 0)$$

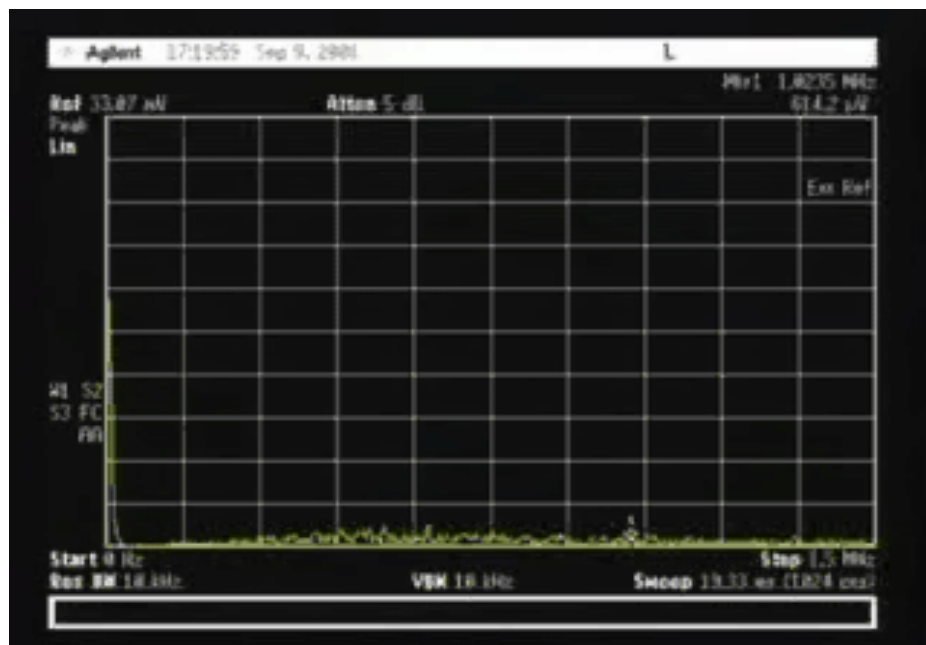
$$f_x = mf + f_b$$

$$(\delta f_b / \delta f < 0)$$

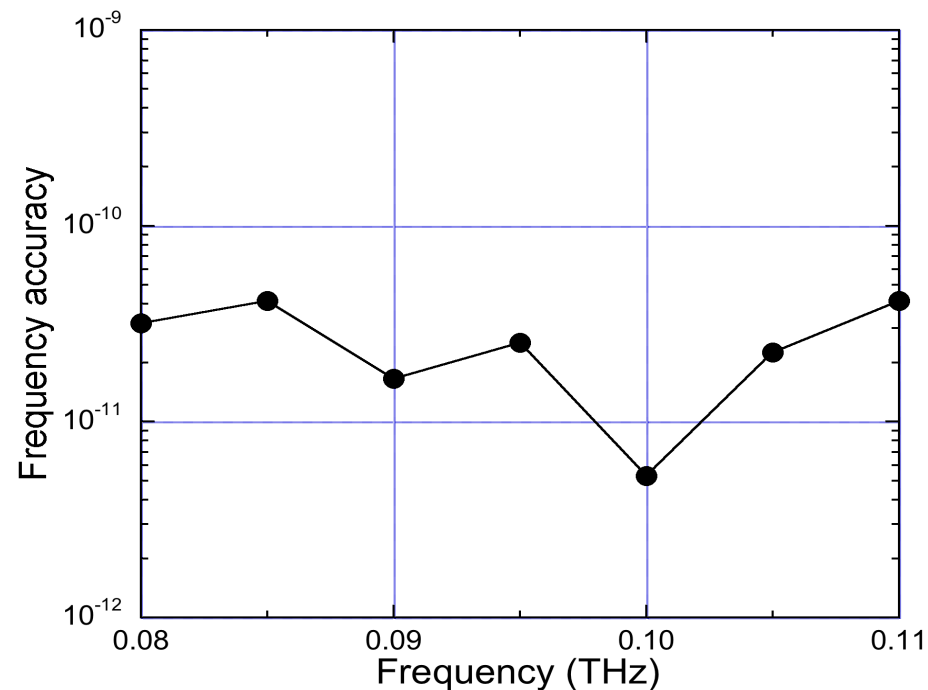


測定結果

スペクトル波形
(0.12THz帯UTC-PD)



周波数測定精度



リアルタイム測定

(阪大・永妻忠夫教授との共同研究)

原子時計レベル

THzクロック (THz-QCLベース)

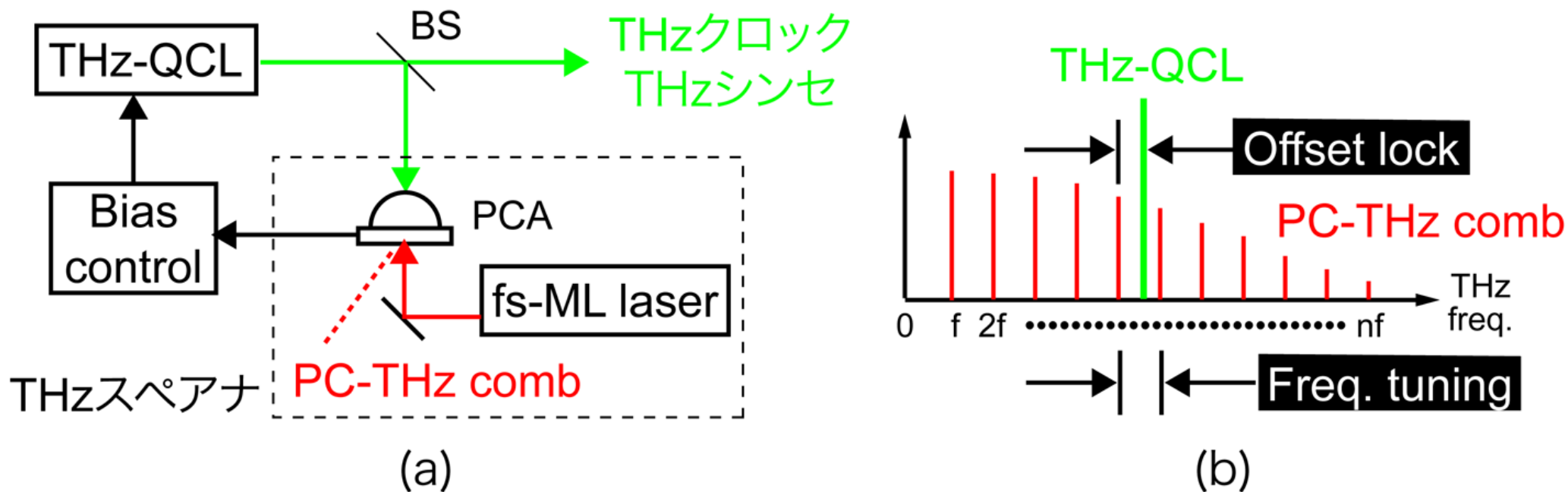
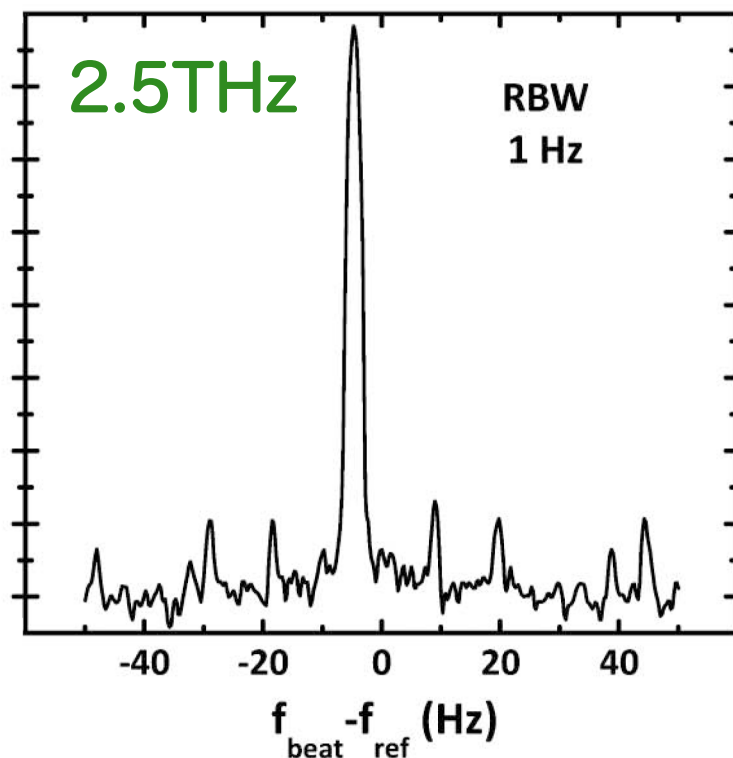


図9 THzクロックの測定原理

THzスペアナの応用 (仏パリ第7大)

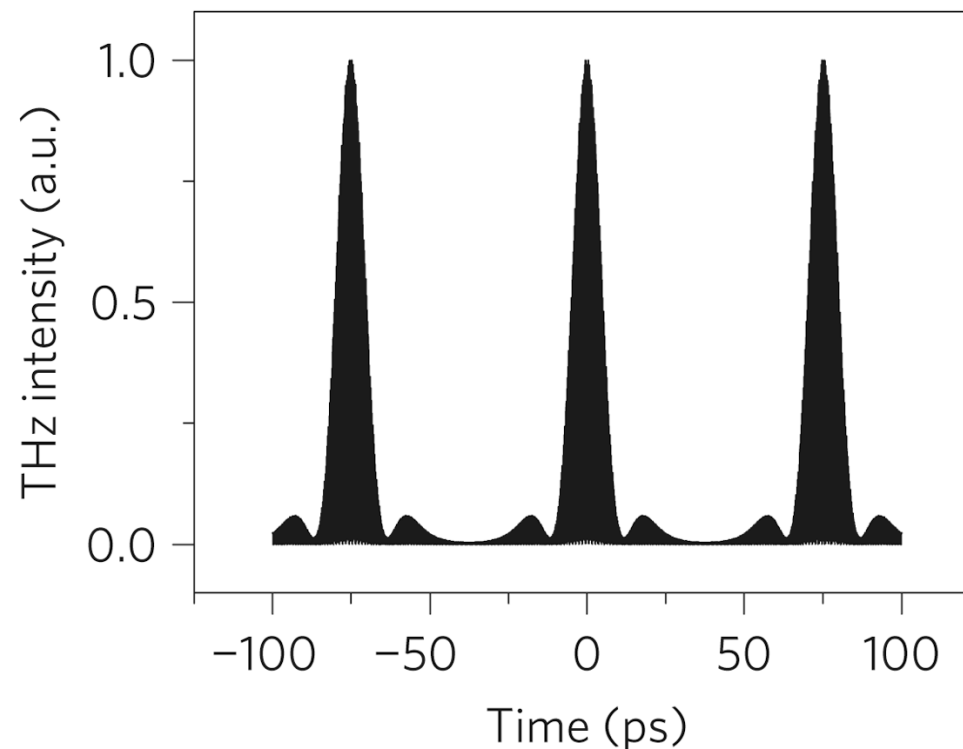
THz-QCLの周波数安定化



ref) OL 36, 3969-3971 (2011)

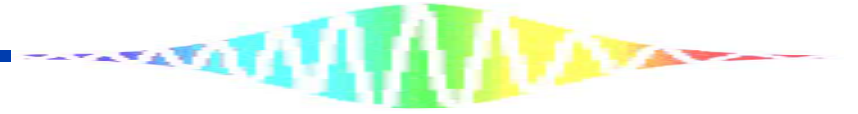
高出力THzクロック

THz-QCLのモード同期



ref) NP 5, 306-313 (2011)

THz-QCLの高性能化

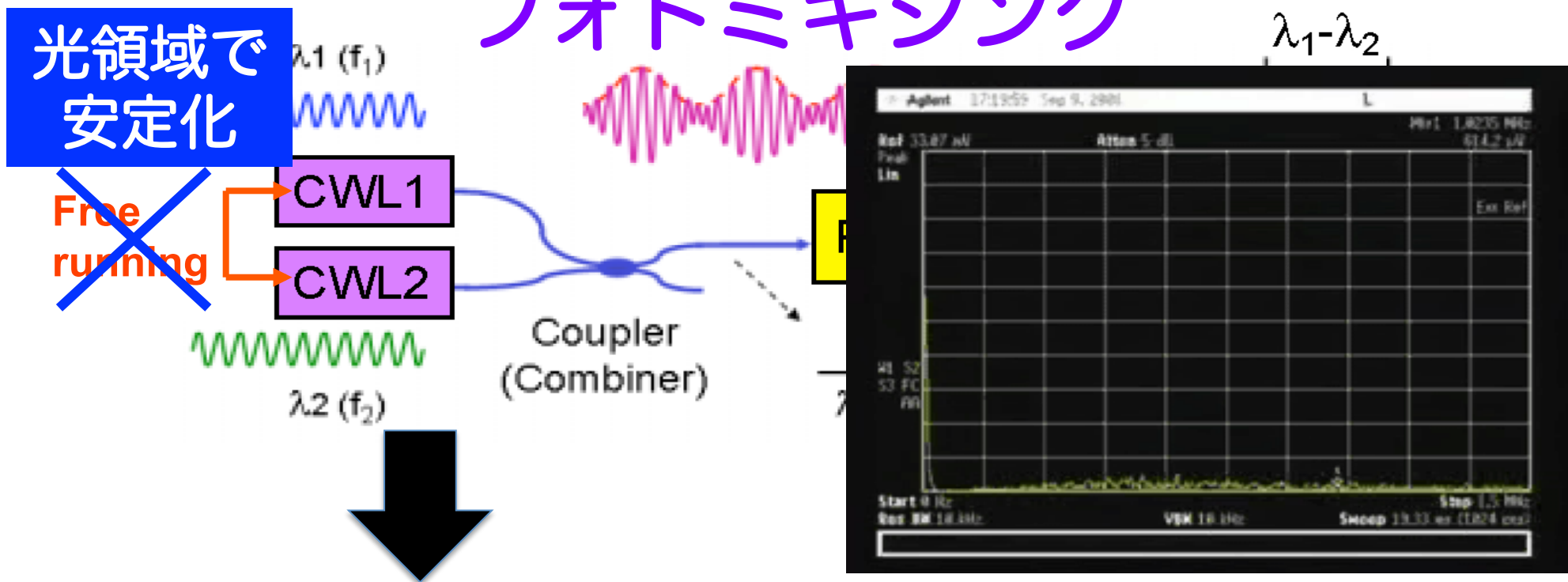


③THzシンセサイザー

～THzの波を作る～

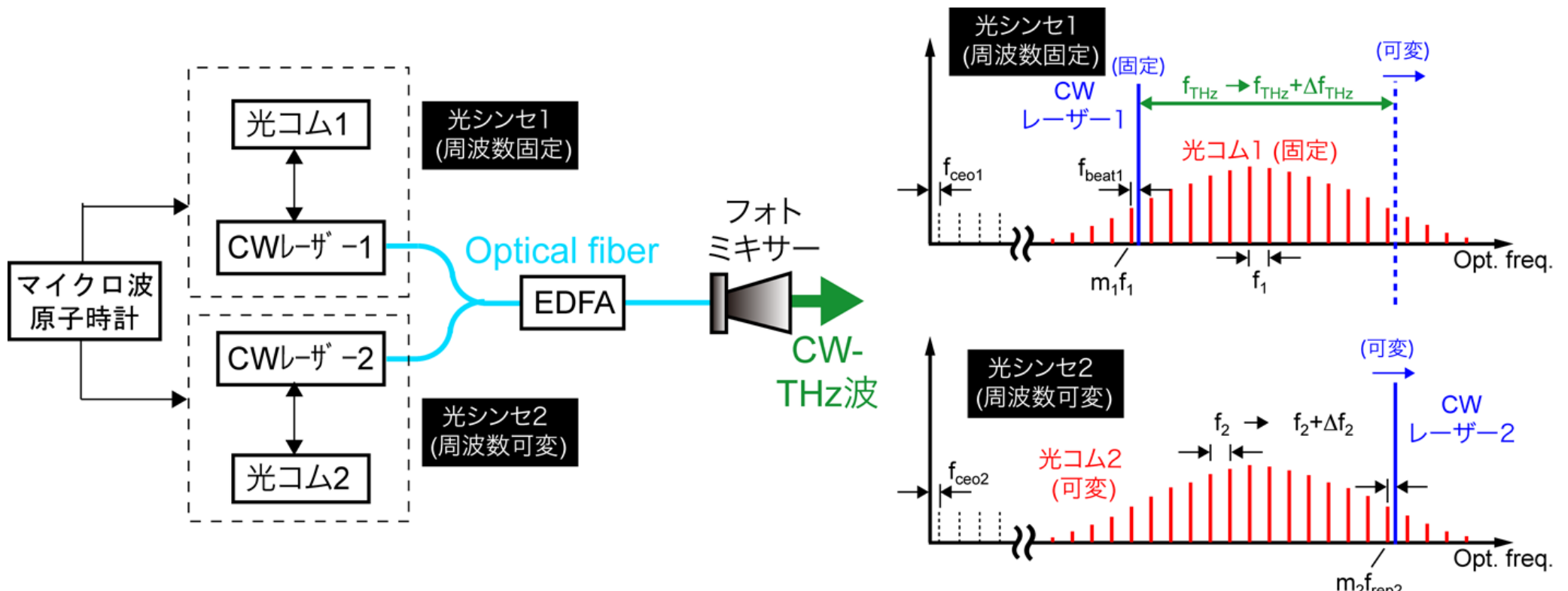
Background

2 台の波長可変 NIR-CW レーザーの フォトミキシング



高確度・高安定・周波数可変CW-THz波
(周波数標準、分光、局部発振器、THz無線キャリア)

デュアル光コムを利用



$$f_{opt1} = f_{ceo1} + m_1 f_{rep1} + f_{beat1}, \quad f_{opt2} = f_{ceo2} + m_2 f_{rep2} + f_{beat2}$$

$$f_{THz} = f_{opt2} - f_{opt1} = (f_{ceo2} - f_{ceo1}) + (m_2 f_{rep2} - m_1 f_{rep1}) + (f_{beat2} - f_{beat1})$$

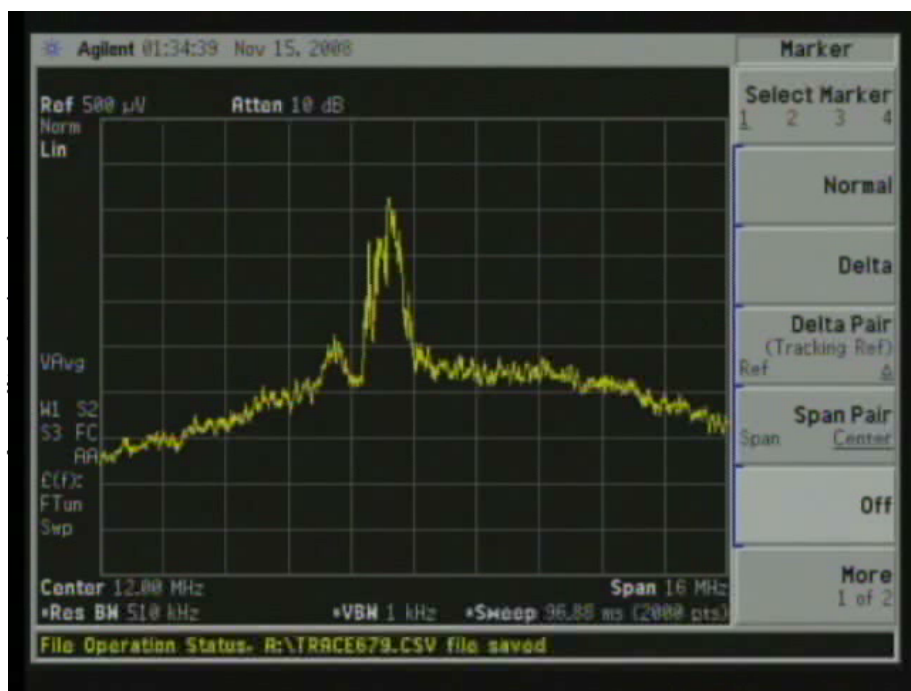
$$\Delta f_{THz} = \Delta f_{opt2} = m_2 \Delta f_{rep2}$$

f_{THz} はマイクロ波周波数標準に位相同期、 Δf_{THz} は1THz以上

絶対周波数の値付け

デュアル光シンセのパラメーター

| | f_{ceo} (Hz) | m | f_{rep} (Hz) | f_{beat} (Hz) | f_{ofs} (Hz) |
|------|-----------------------|-----------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| OFS1 | 10,683,000 | 3,889,264 | 49,985,129.0 | -21,384,000 | 194,405,352,054,056 |
| OFS2 | 10,683,000 | 3,811,224 | 50,971,884.1 | 69,960,000 | 194,265,348,650,138 |



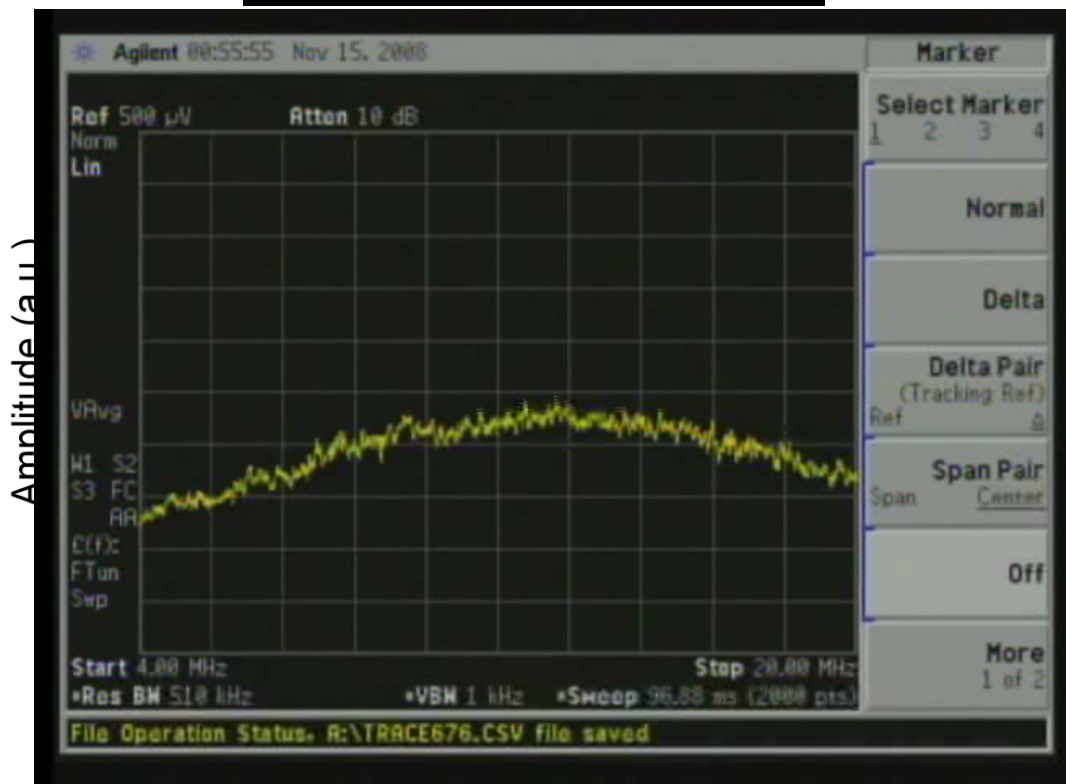
Center frequency of CW-THz wave (f_{THz})

140,003,403,918 Hz
(uncertainty = 10^{-12})

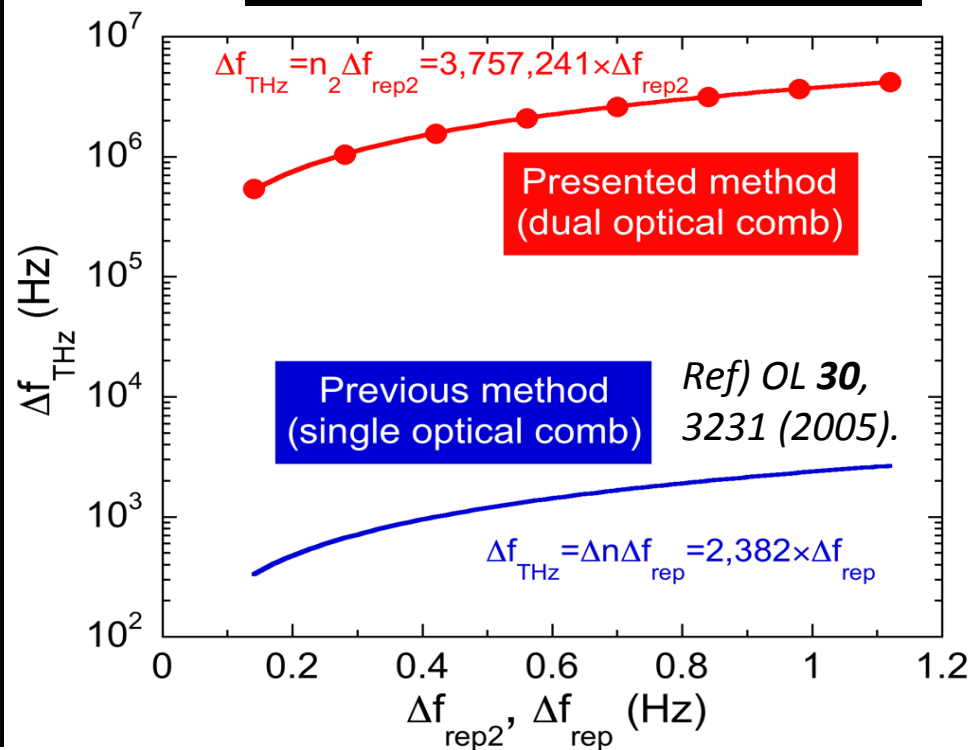
THzクロックの実現

CW-THz波のステップチューニング (f_{rep2} を0.2Hz刻みで可変@0.13THz帯)

スペクトル変化

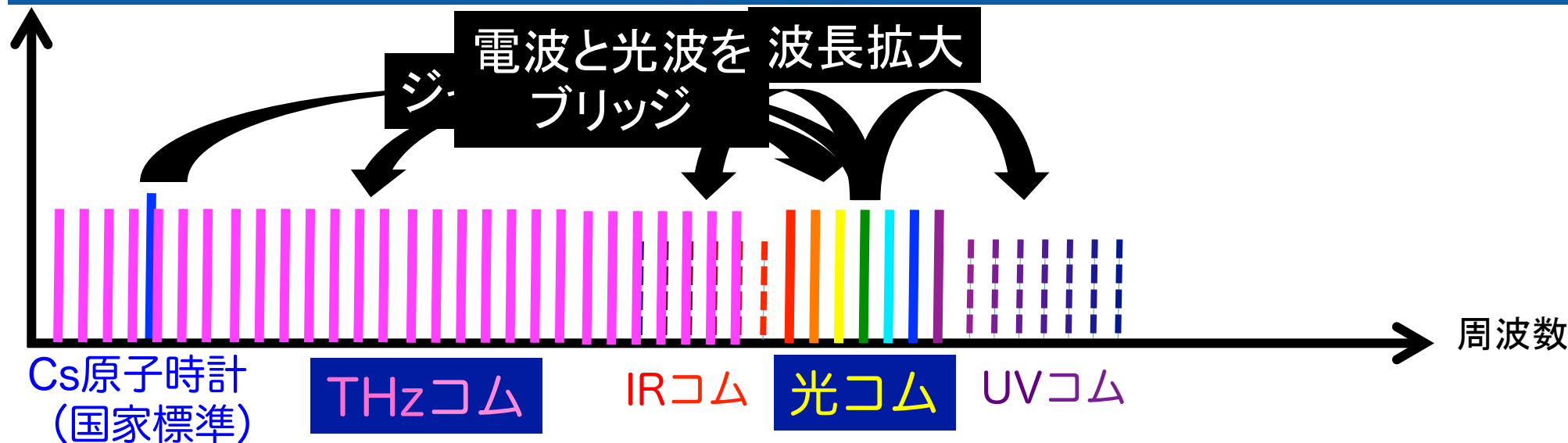
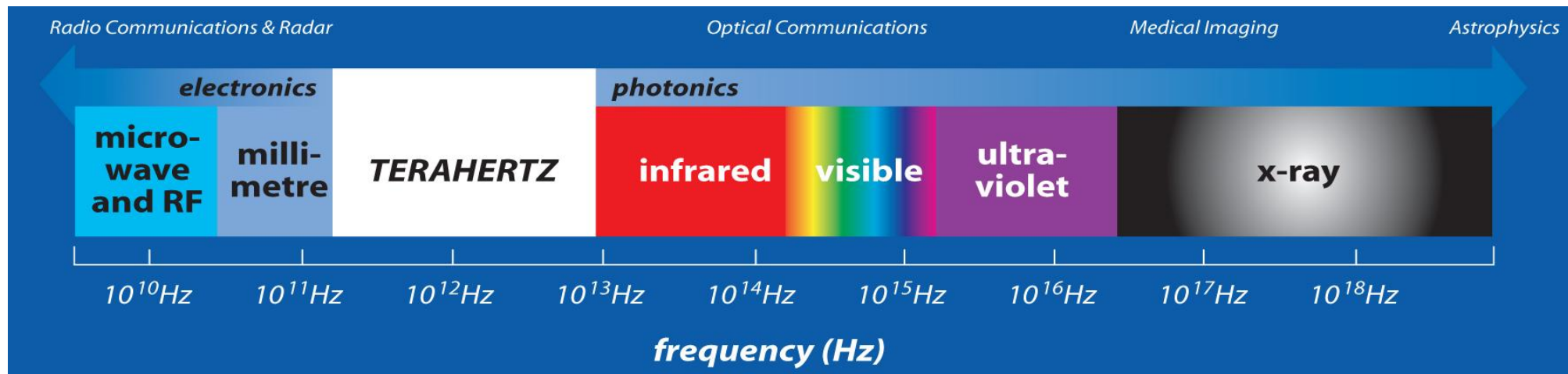


チューニング特性



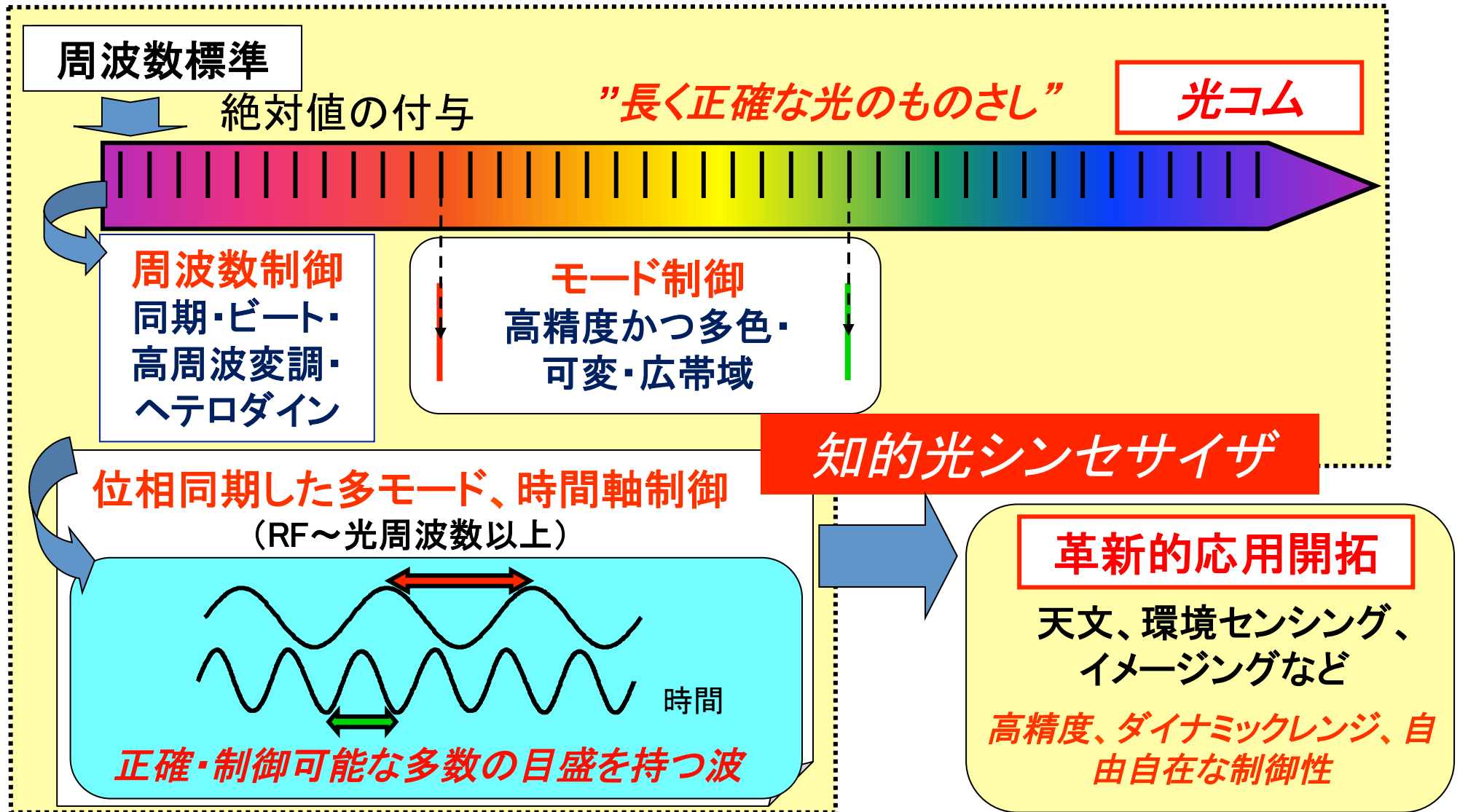
$$\Delta f_{THz} = m_2 \Delta f_{rep2} = 3,757,241 \times \Delta f_{rep2}$$

電磁波のコヒーレント周波数リンク



各電磁波領域の境界を超えて、周波数を『同一精度』で論じることが可能！

知的光シンセサイザとその革新的応用



デュアル光コムの利用

計測手法

- ① RFコムロックインイメージング
- ② 非線形ラマン分光 (CARS, SRS) との融合
- ③ 偏光コム (偏光測定との融合、チャネルドスペクトル?)
- ④ デジタル・ホログラフィー、ゴーストイメージング
(波長情報の超多重化?、振幅 & 位相情報の同時取得)
- ⑤ ドップラーシフト・コム (何に使える? 光周波数依存性?)
- ⑥ 新奇コム分光法 (単一光コム) によるコム・モード分解スペクトル取得

応用計測展開

- ① 呼吸診断、バイオイメージングへの応用
- ② 燃焼過程

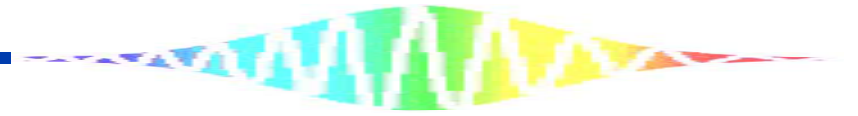
THzコムの利用

計測手法

- ① 光コム位相同期THz-QCL
- ② THz電場イメージング
- ③ THzデジタル・ホログラフィー
- ④ THzゴースト・イメージング

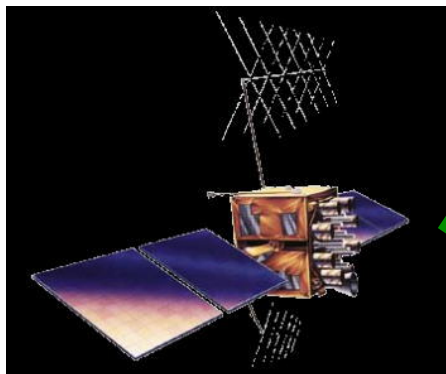
応用計測展開

- ① 呼気診断
- ② 燃焼過程
- ③ 非破壊検査
- ③ バイオイメージング



GPSシステムによるトレーサビリティ体制

GPS衛星 (原子時計内蔵)



GPS信号には、原子時計
(GPS衛星搭載) による
時刻信号が含まれている

標準時刻
信号



地球局

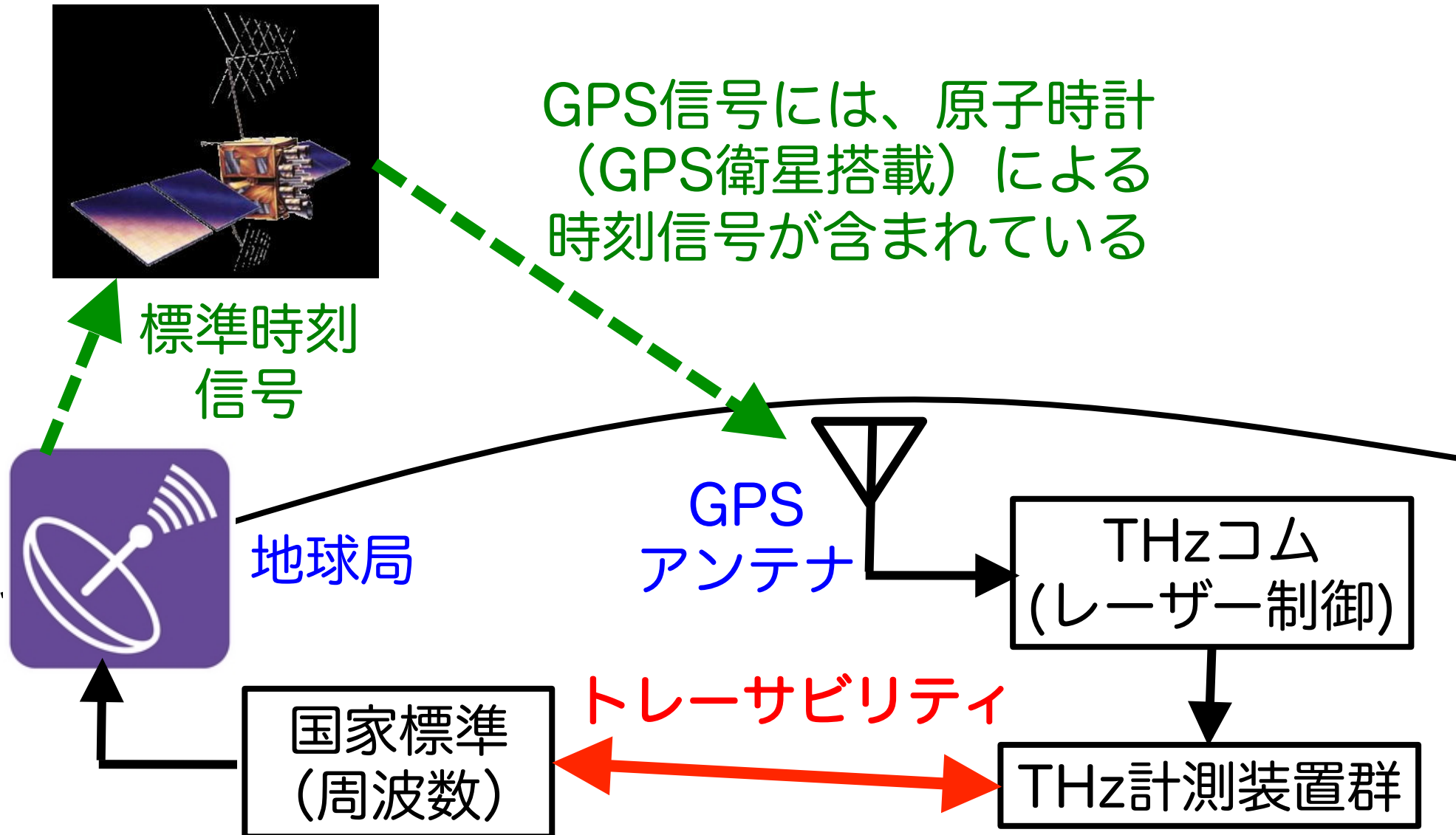
GPS
アンテナ

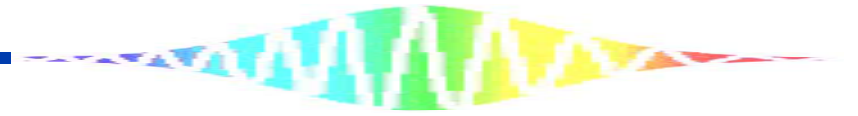
THzコム
(レーザー制御)

国家標準
(周波数)

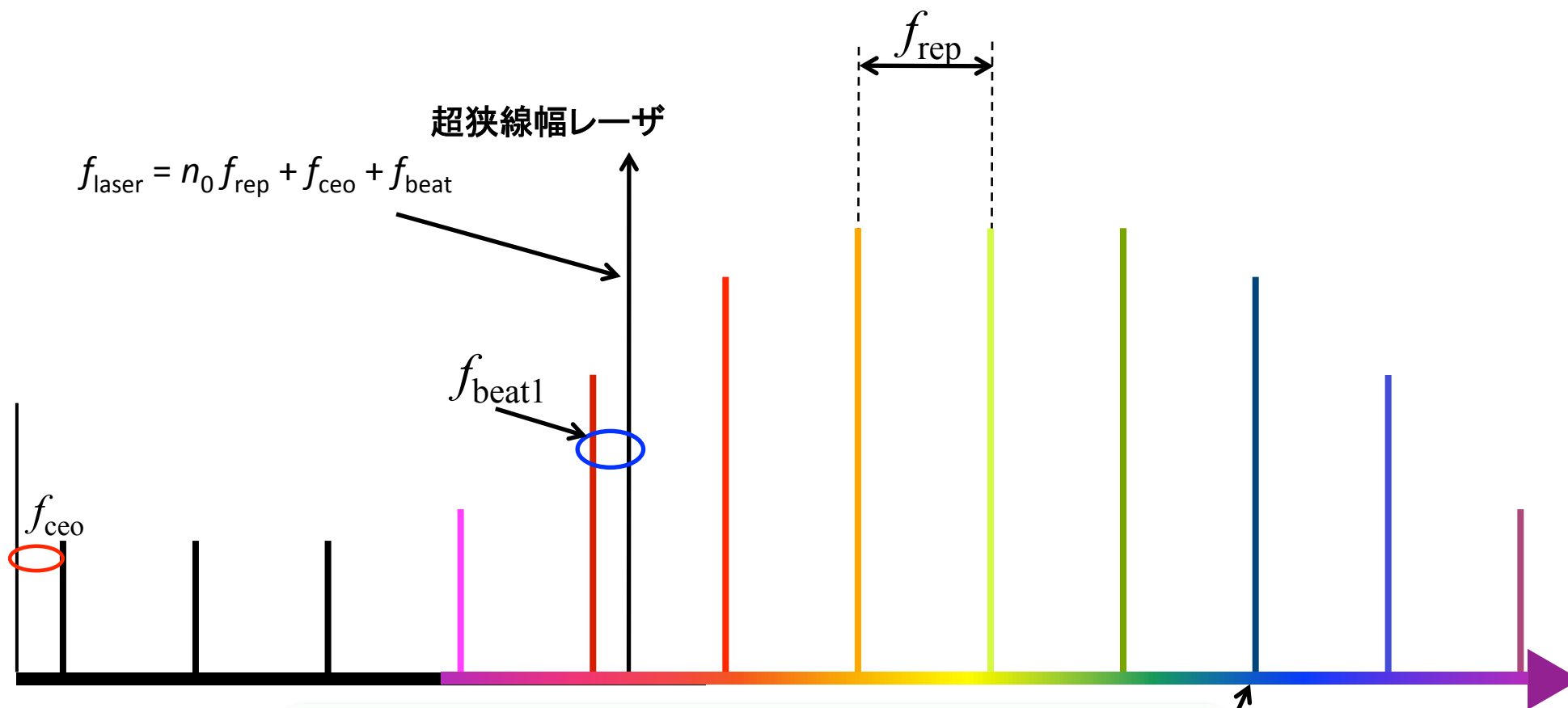
トレーサビリティ

THz計測装置群



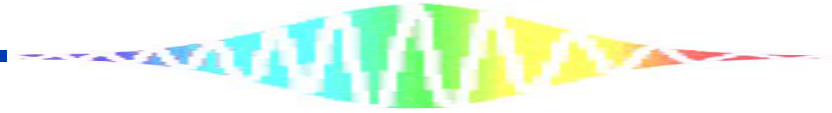


光コムの中の狭線幅化



$$f(n) = n f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}} = \frac{n}{n_0} f_{\text{laser}} + \left\{ 1 - \frac{n}{n_0} \right\} f_{\text{ceo}} - \frac{n}{n_0} f_{\text{beat1}}$$

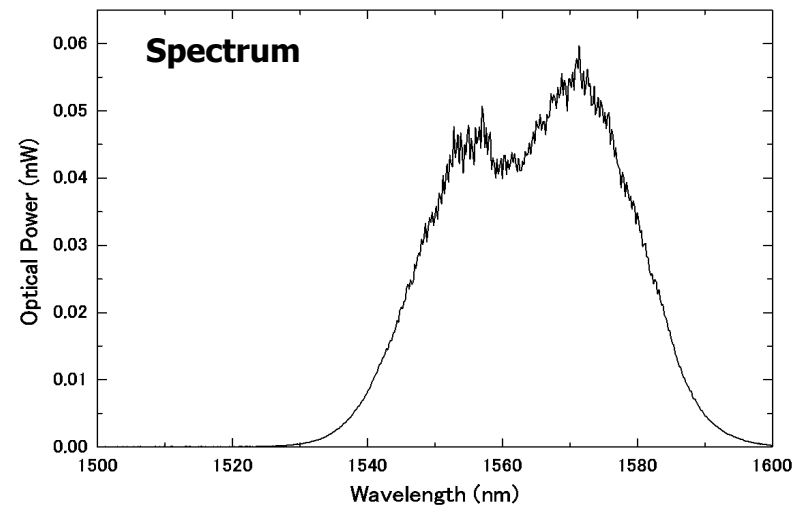
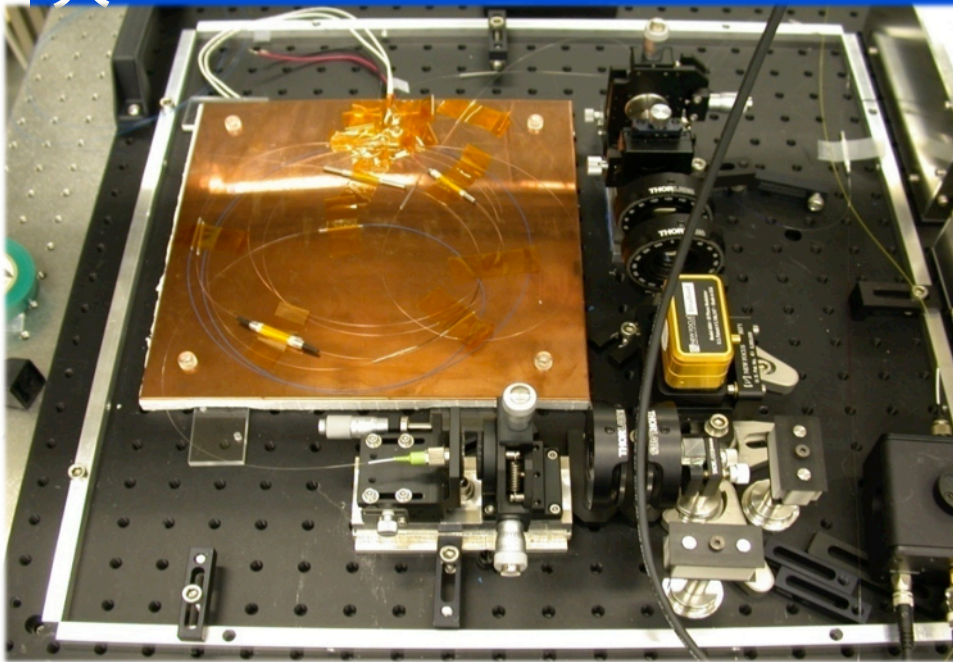
2つのモードを狭線幅化すれば、全てのモードが狭線幅化される

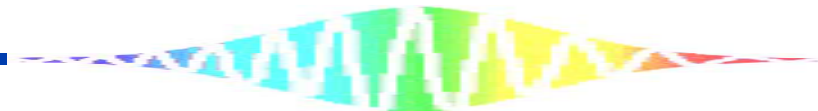


高速制御可能なモード同期ファイバーレーザー

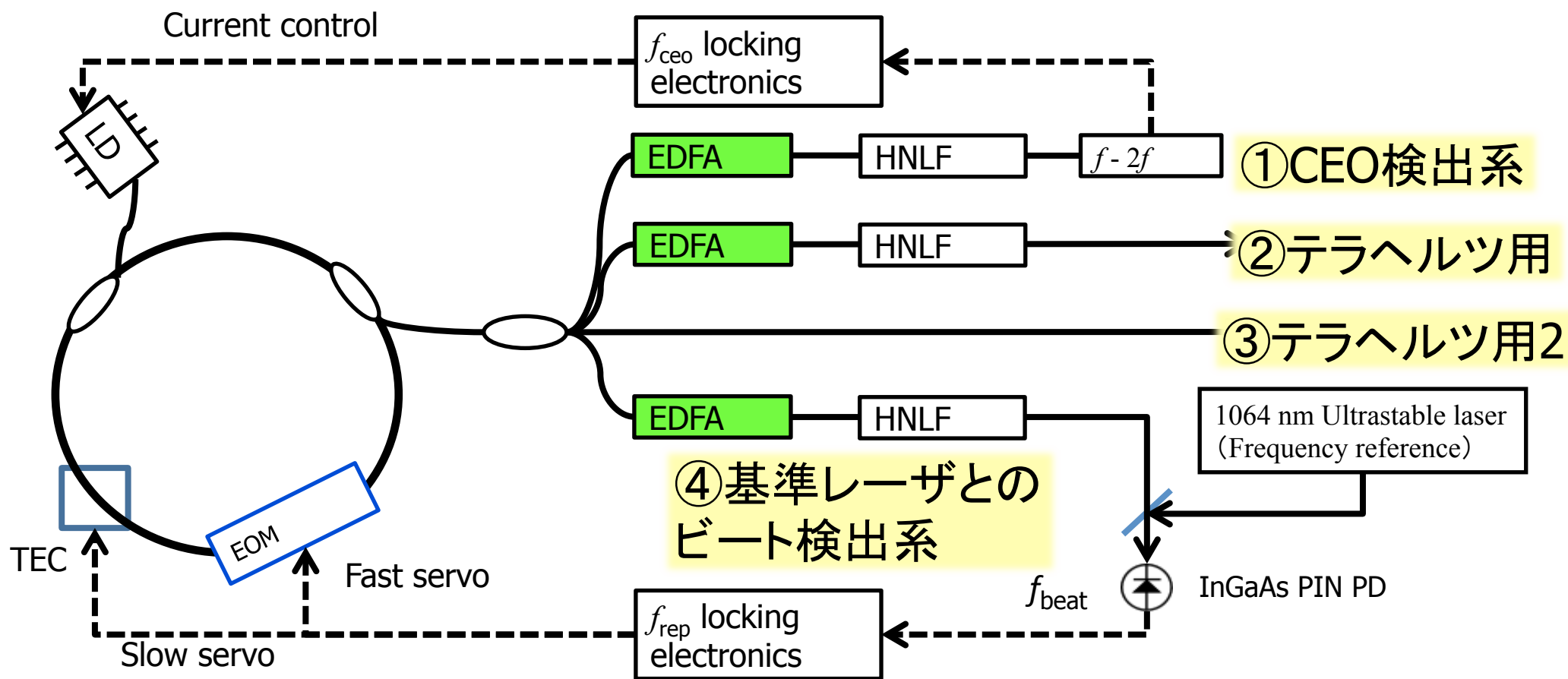
- シンプルで信頼性の高い、Er添加光ファイバーを用いたリング型モード同期レーザー
- 高速に共振器長を制御するために、共振器内に電気光学変調器を挿入

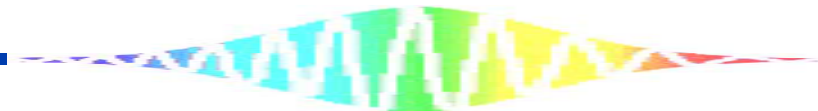
- Pulse width: ~ 100 fs
- Mode-locking mechanism: Nonlinear polarization rotation
- Repetition rate: Around ~ 43 MHz
- Averaging power: ~ 3 mW



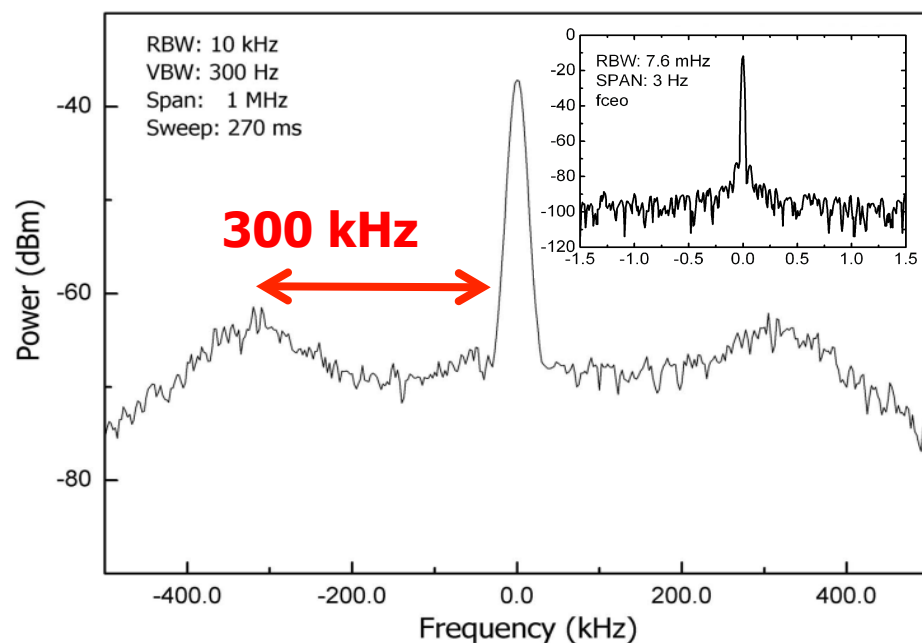


狭線幅化のための実験系



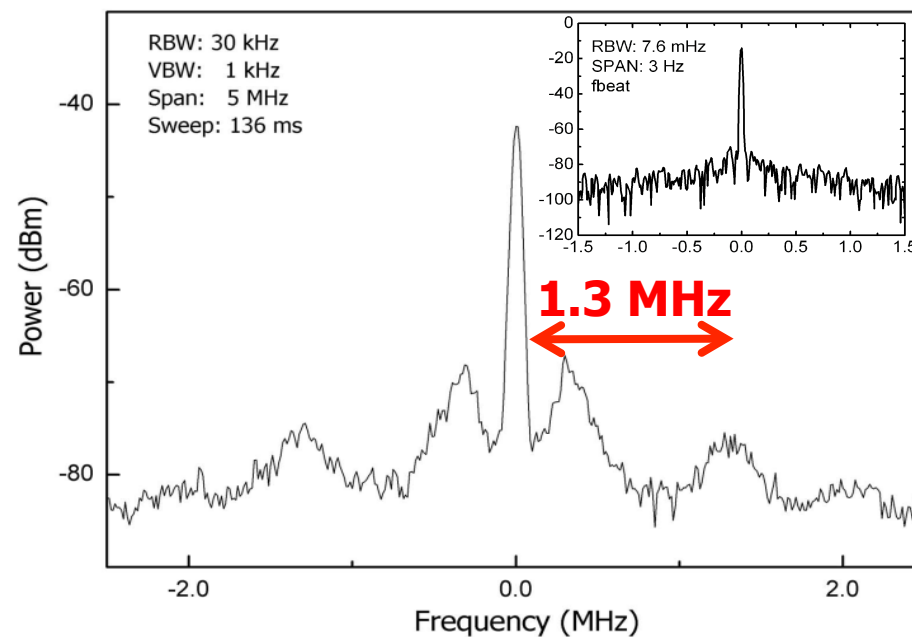


f_{ceo} と f_{beat} のインループスペクトラム



The phase-locked f_{ceo} spectrum

Servo bandwidth: 300 kHz

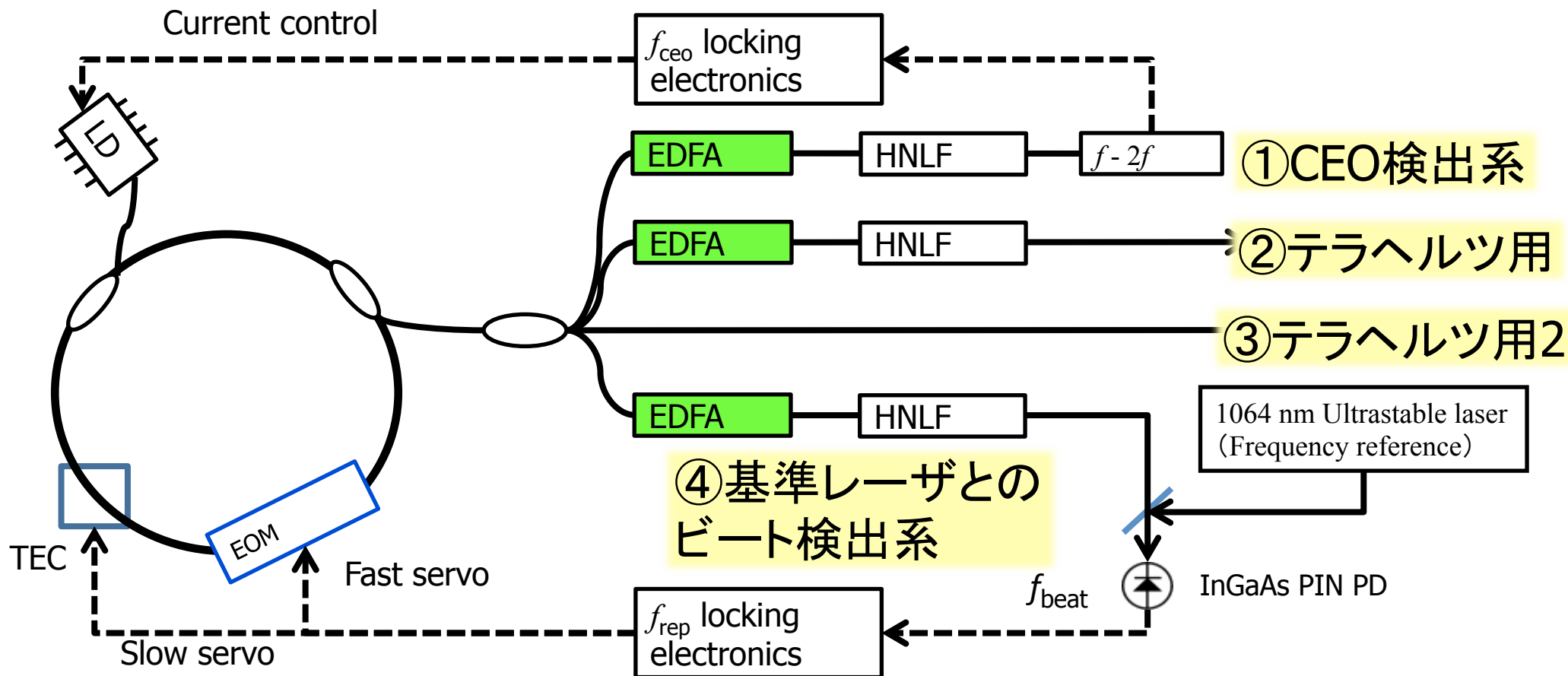


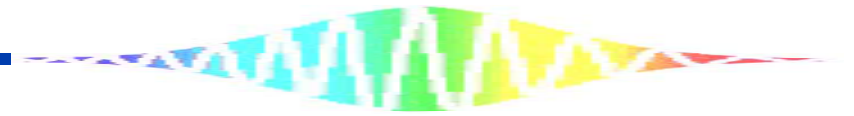
The phase-locked f_{beat} spectrum (In-loop)

Servo bandwidth: 1.3 MHz

デュアル光コムモード同期周波数安定化と狭線幅化

共振器構成

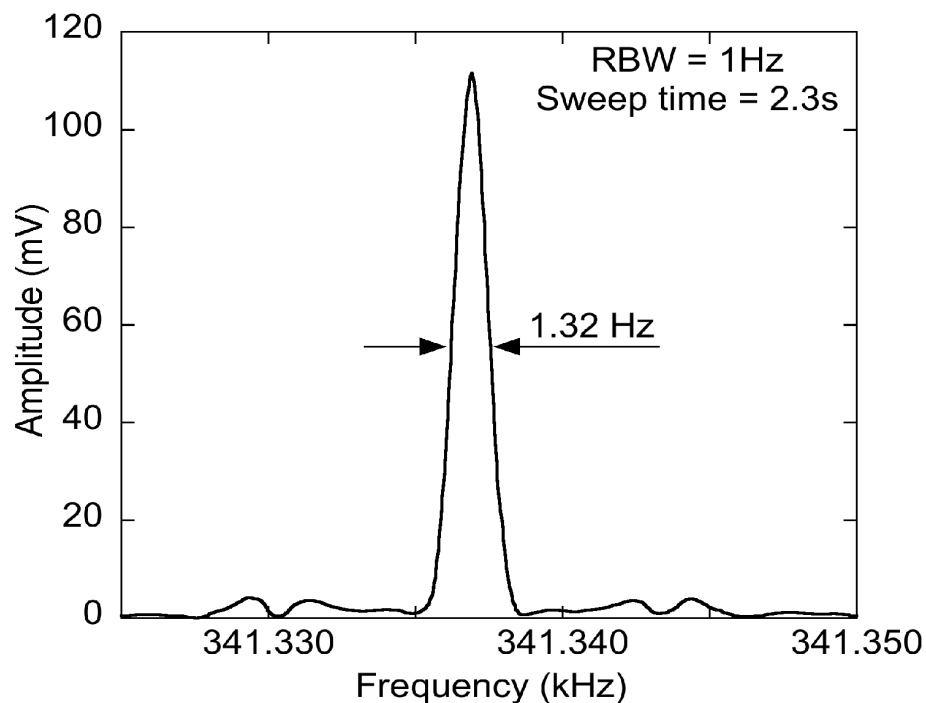




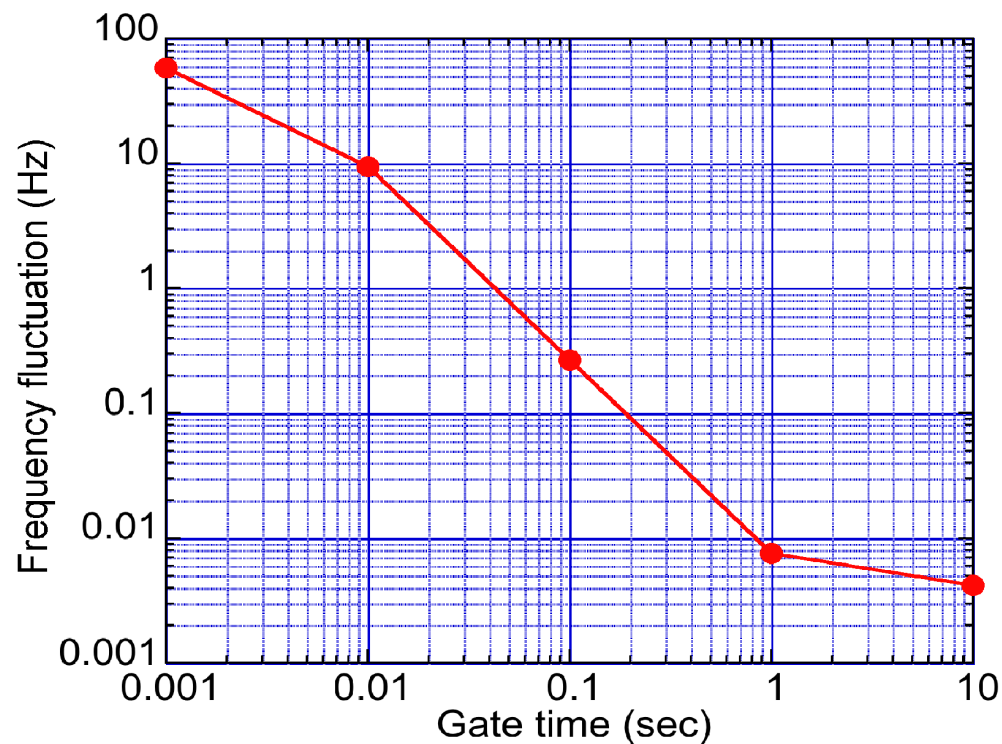
THzコム・モードの線幅

サブTHz帯CW-THz光源(周波数逡倍器、周波数80GHz、線幅<0.6THz)

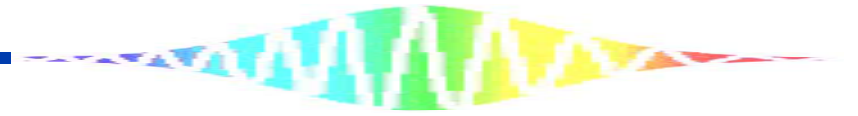
RF frequency spectrum



Frequency fluctuation



Linewidth = 10 mHz at 1 sec

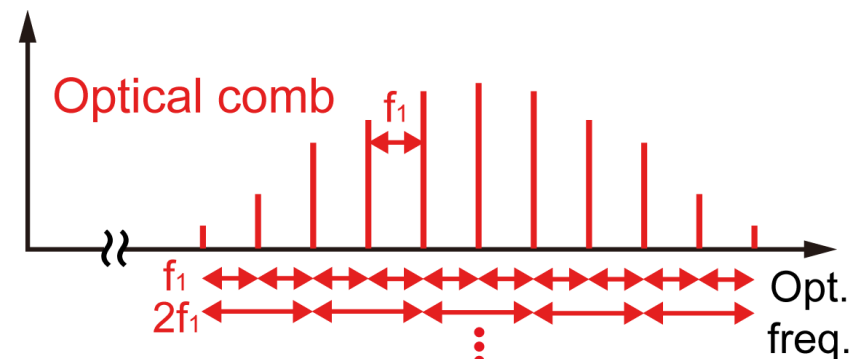
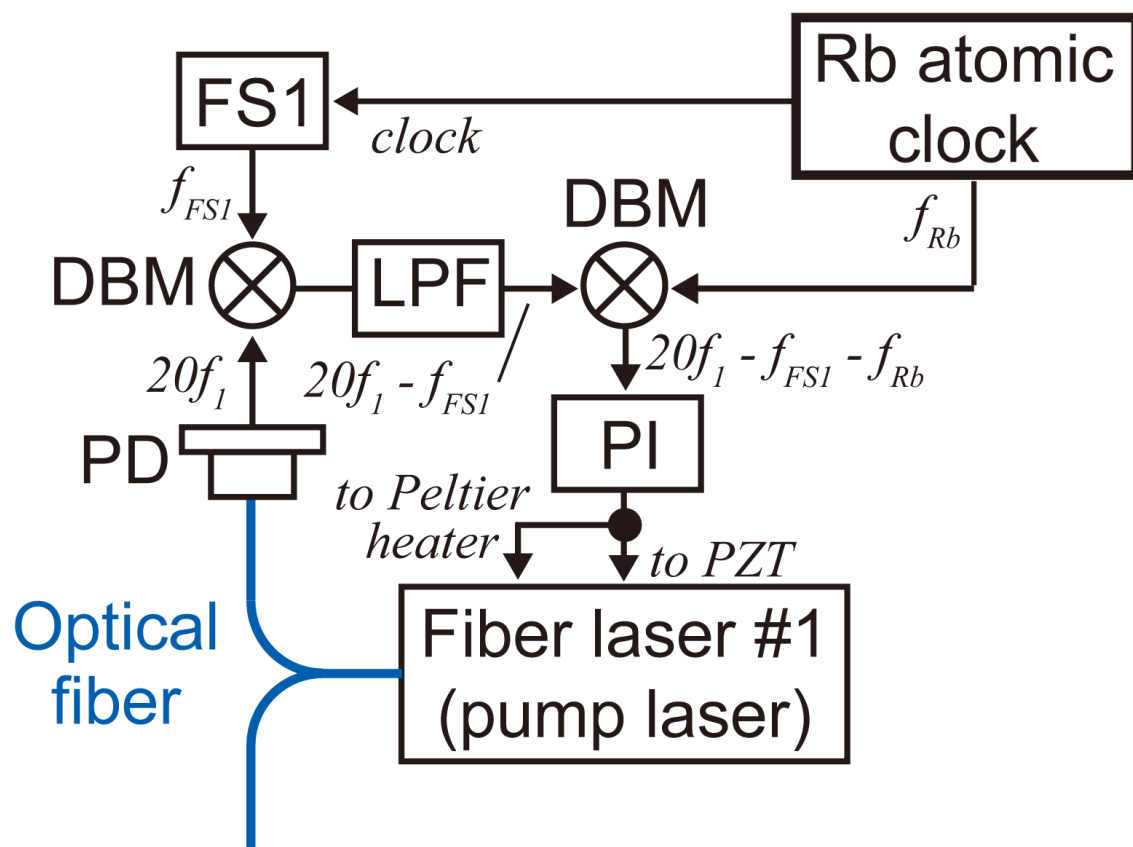


モード同期周波数（コム間隔）の制御

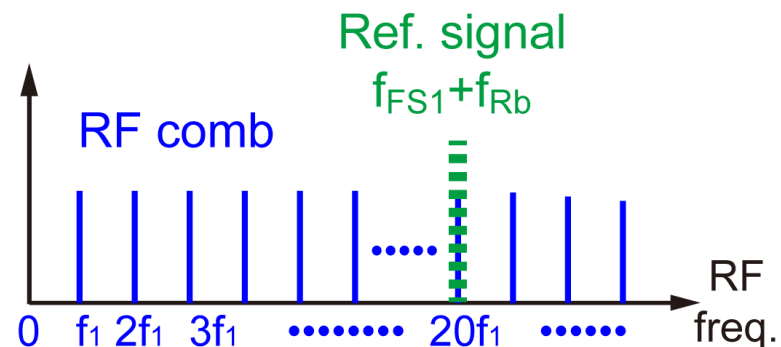
モード同期周波数
(コム間隔)

$$f_{rep} = \frac{c}{nL}$$

c : 光速@真空
 n : 共振器の屈折率
 L : 共振器長

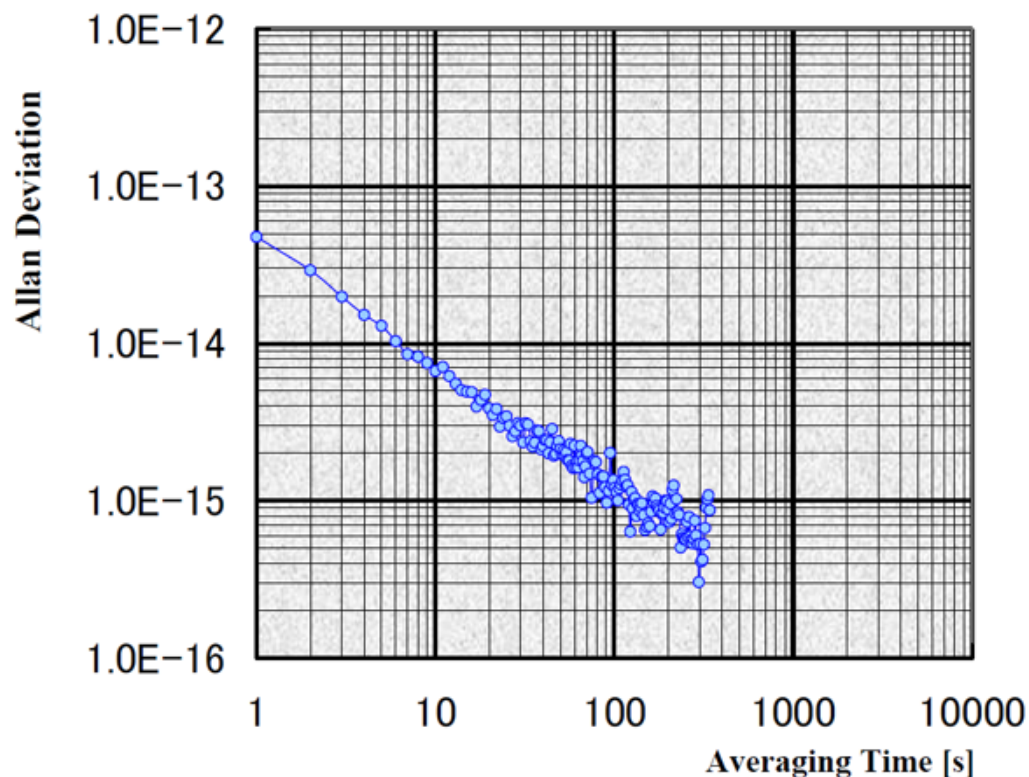


PD検出



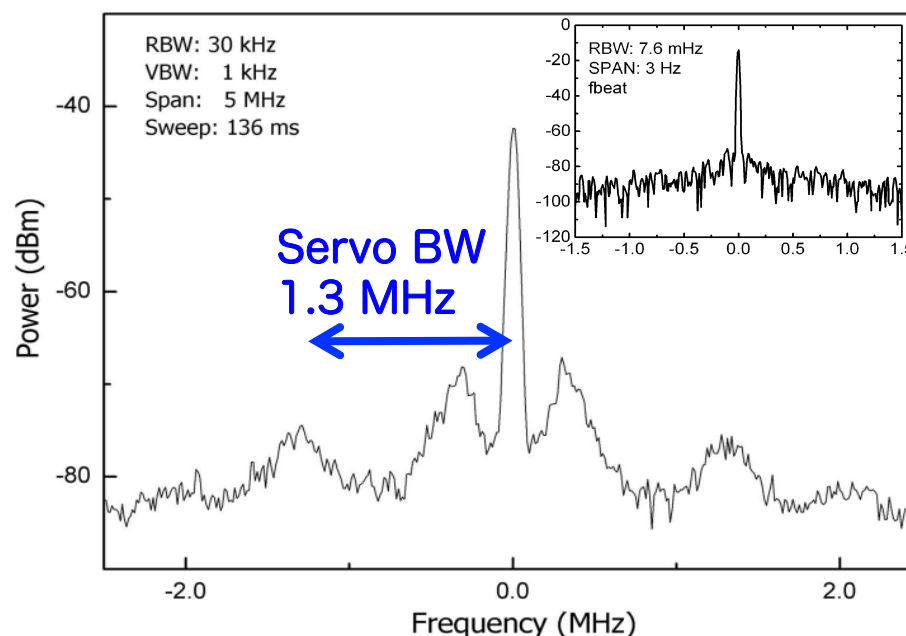
モード同期周波数安定化と狭線幅化

モード同期周波数の安定度



不確かさ 10^{-14} @ 1秒を達成
(目盛り間隔が極めて等しい)

光コムモードのスペクトル



30mHzの狭線幅化を実現
(目盛り線幅が極めて狭い)