

# 超高繰り返し光周波数コム of 現状

東京大学大学院工学系研究科

吉岡 孝高

2021/12/10 可視赤外線観測装置技術ワークショップ2021



Prof. M. Doi  
Prof. E. Kambe

Prof. K. Motohara

Prof. H. Izumiura

E. Chae

K. Yoshioka



The University of Tokyo

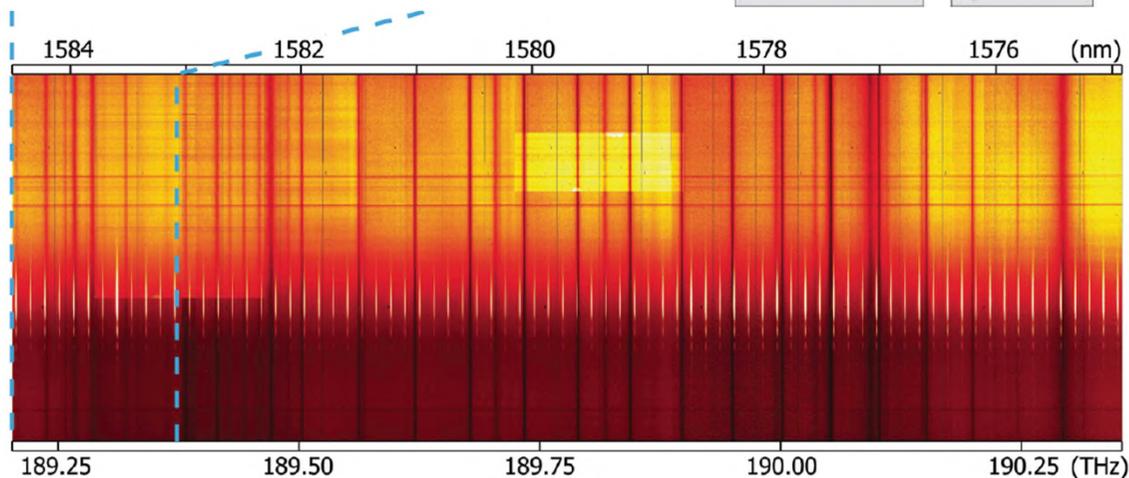
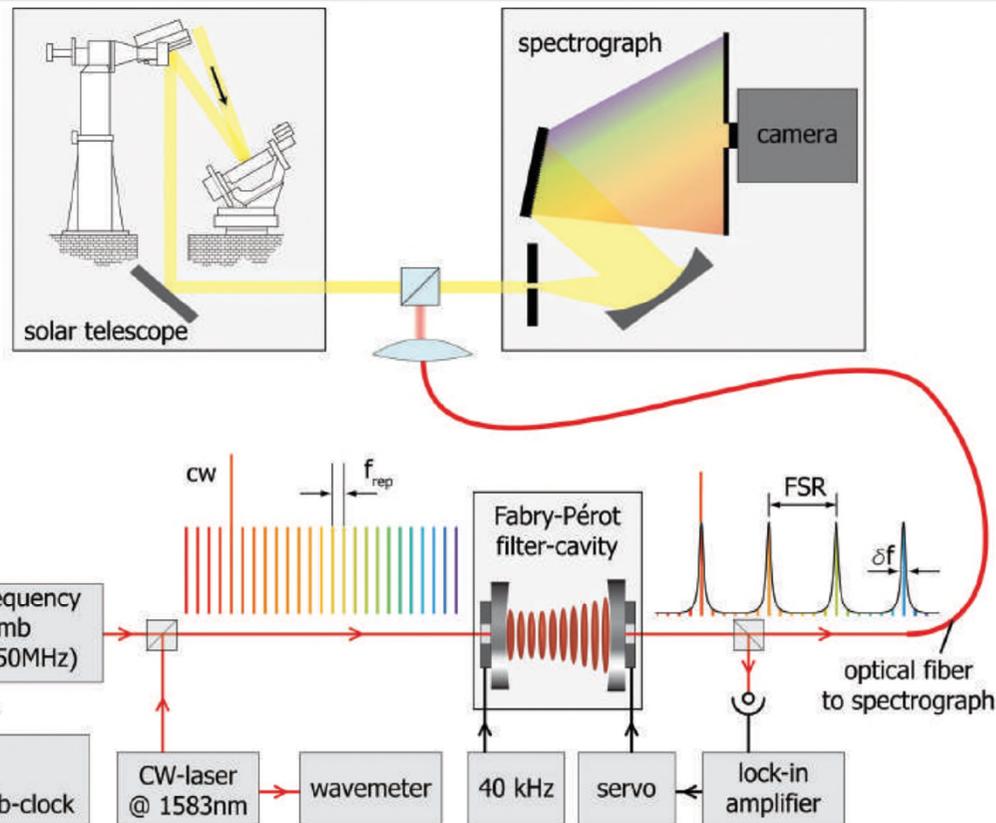


National Astronomical  
Observatory of Japan

# 天文コム

絶対周波数が定まった等間隔な  
「ものさし」

視線速度変化の感度 $<10$  cm/sを実現  
しうる校正光源として  
2007-2008年頃に検討が始まる

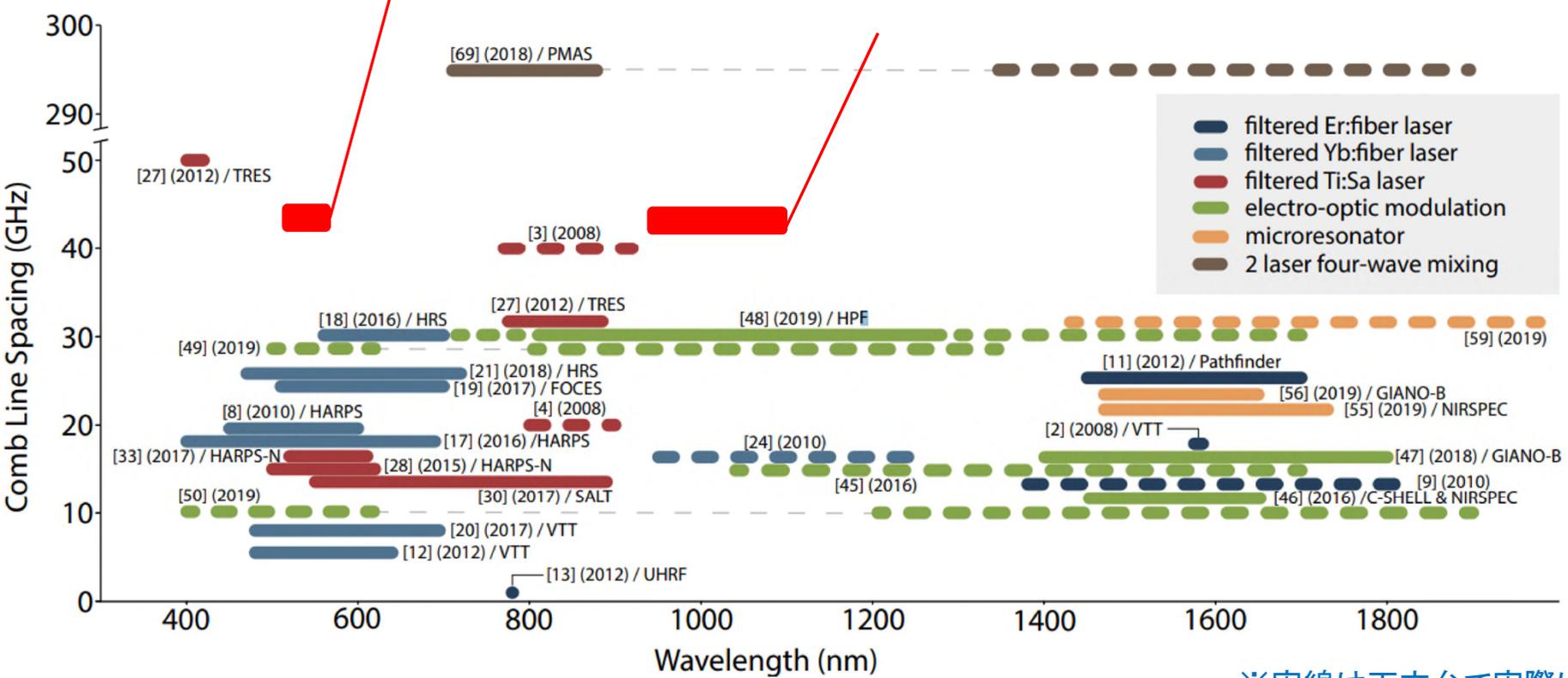


T. Steinmetz, *et al.*, Science **321**, 1335 (2008).

# 最近の天文コムの開発状況

(2021)/HIDES 実験は2017.12  
 E. Chae *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **38**, A1 (2021).

Yバンド用、Sidemode suppression 40dB  
 準備中



T. Herr *et al.*, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **31** 1890 (2019) ※実線は天文台で実際にテストされたもの

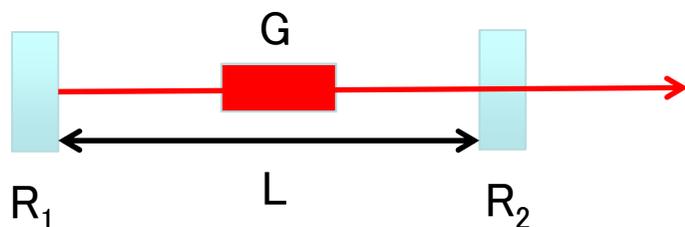
Sidemode suppressionの性能は様々  
 帯域の広さとSidemode suppressionの両立が”filtered” astrocombの課題

EOコム、マイクロコムの進展

- 光周波数コム of 概要
- 緑色天文コム of 運転試験(HIDES)
- Yバンド天文コム of 開発状況
- 新しいタイプの超高繰り返しコム of 紹介

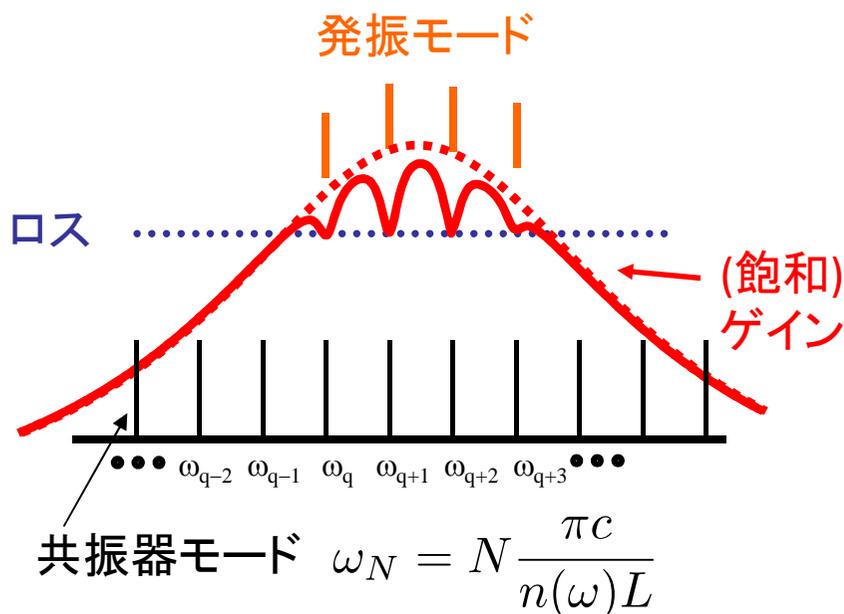
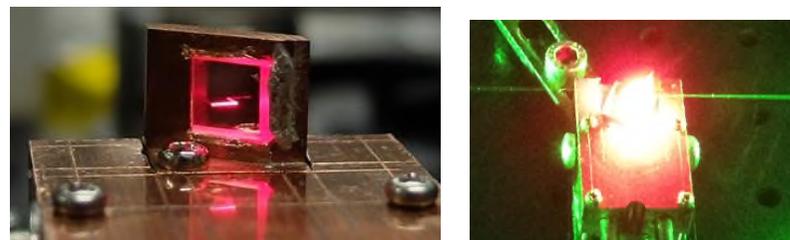
# マルチモード発振(cw発振)

## レーザーの構成



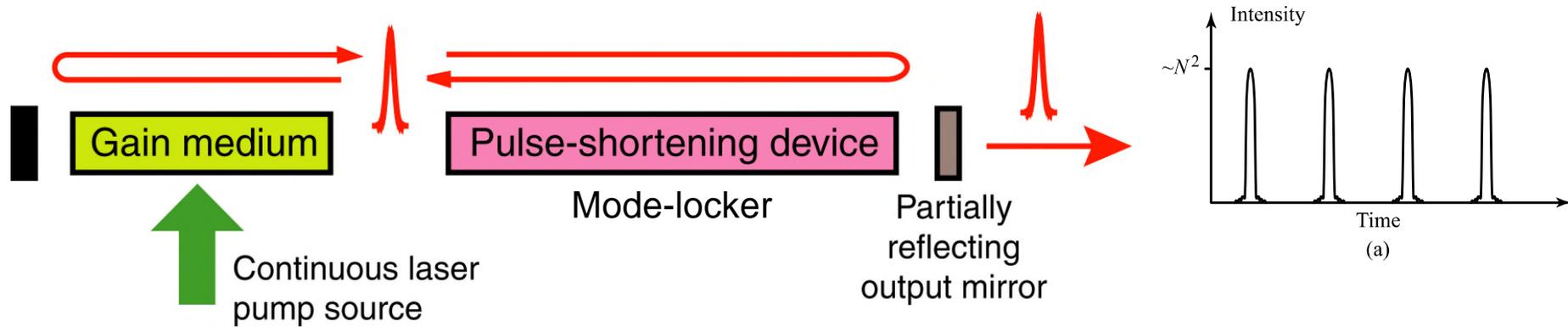
光共振器内に光増幅媒質  
共振条件: 共振器を1周する光学長が波長の整数倍

## ゲイン媒質の例 (Ti:sapphire)

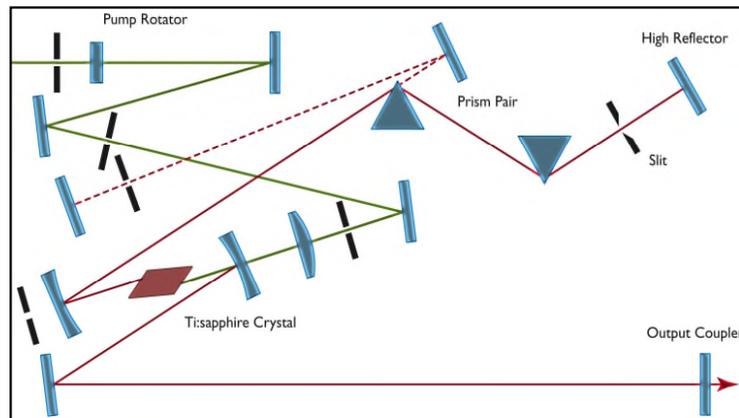


- レーザー発振中、ゲインとロス釣り合っている。
- 余ったパワーが出力光パワー。
- ゲインが不足するモードでは発振しない。
- 発振縦モード間隔は一般に等間隔ではない。
- 発振光周波数間の相対位相はランダムかつ変動する。

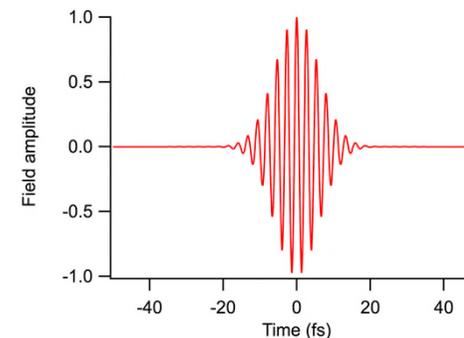
# モード同期レーザー



パルス間隔は光が共振器を一周する時間。  
規則正しくパルスが出てくる



Del Mar Photonics



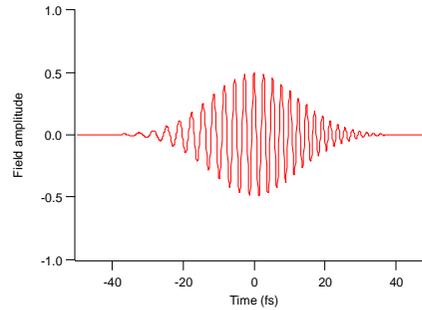
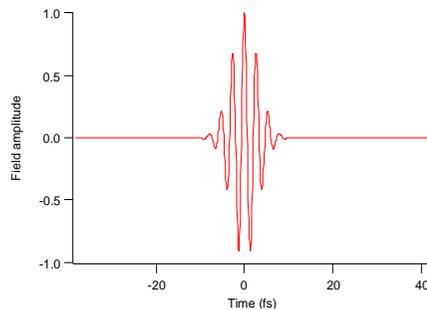
- 規則正しく、光パルス列が発生するレーザー
- パルス幅は10 fs(=10<sup>-14</sup> s)程度も可能
- 瞬間電場強度が著しく高くなる
- 超高速分光(フェムト秒-ナノ秒)を可能にした

# モード同期レーザーの成立条件

マルチモードレーザーは、自然にはモード同期を起こさない。

大まかには、2つの条件が満たされればモード同期が安定動作する。

**条件1** 共振器を1周したときに、パルスが安定な解である必要がある。

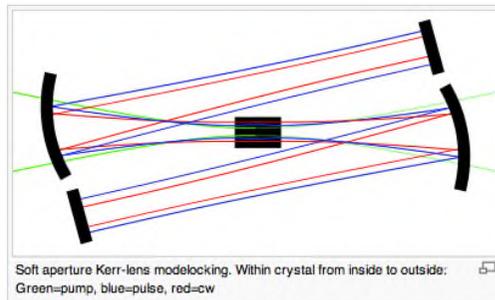


レーザー中には分散があるため、何も工夫をしなければ光パルスは形状を保てない(「チャープ」)。



プリズムやチャープミラーを用いた分散補償

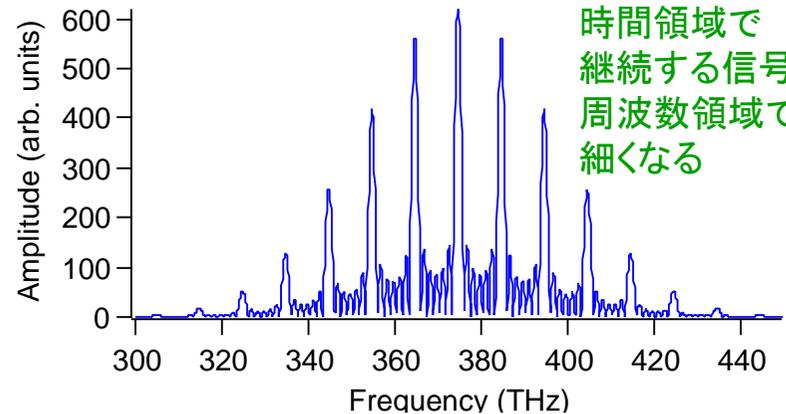
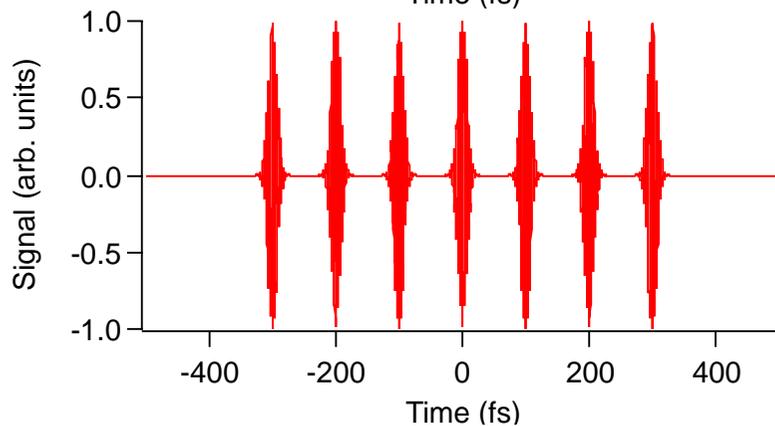
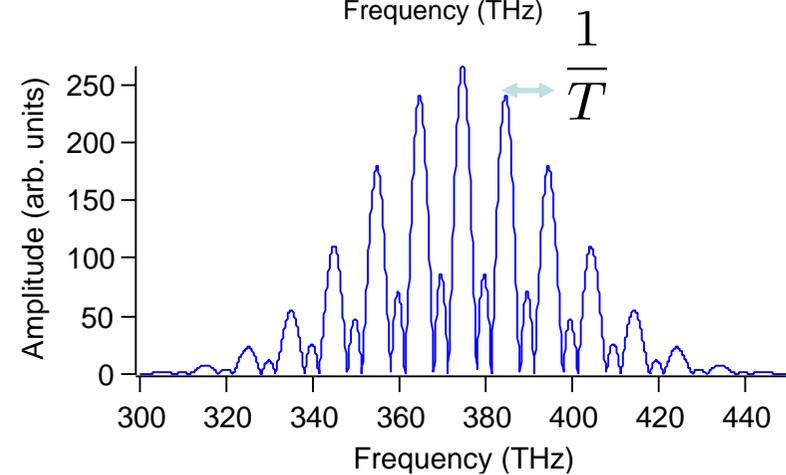
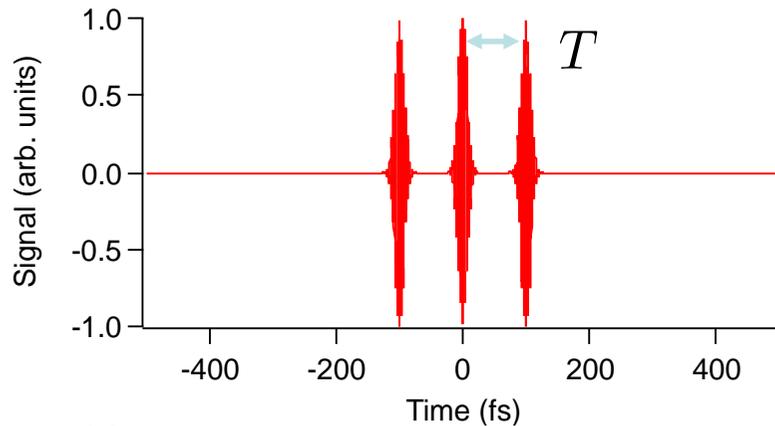
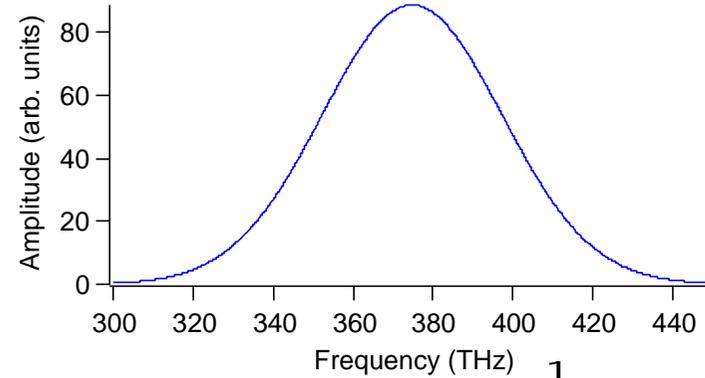
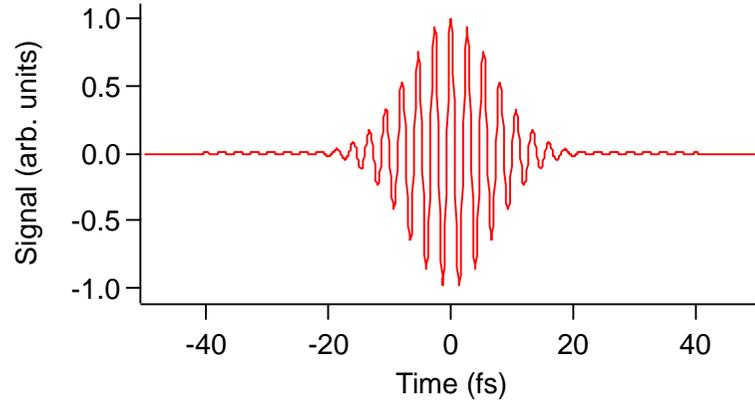
**条件2** パルスを走らせる方が、連続波(cw)発振よりもレーザーの中では得である必要がある。



パルスは瞬間的に著しく強い光なので、非線形光学効果で差が出るようにする。  
カーレンズ効果や非線形偏波回転を用いた自己振幅変調を利用

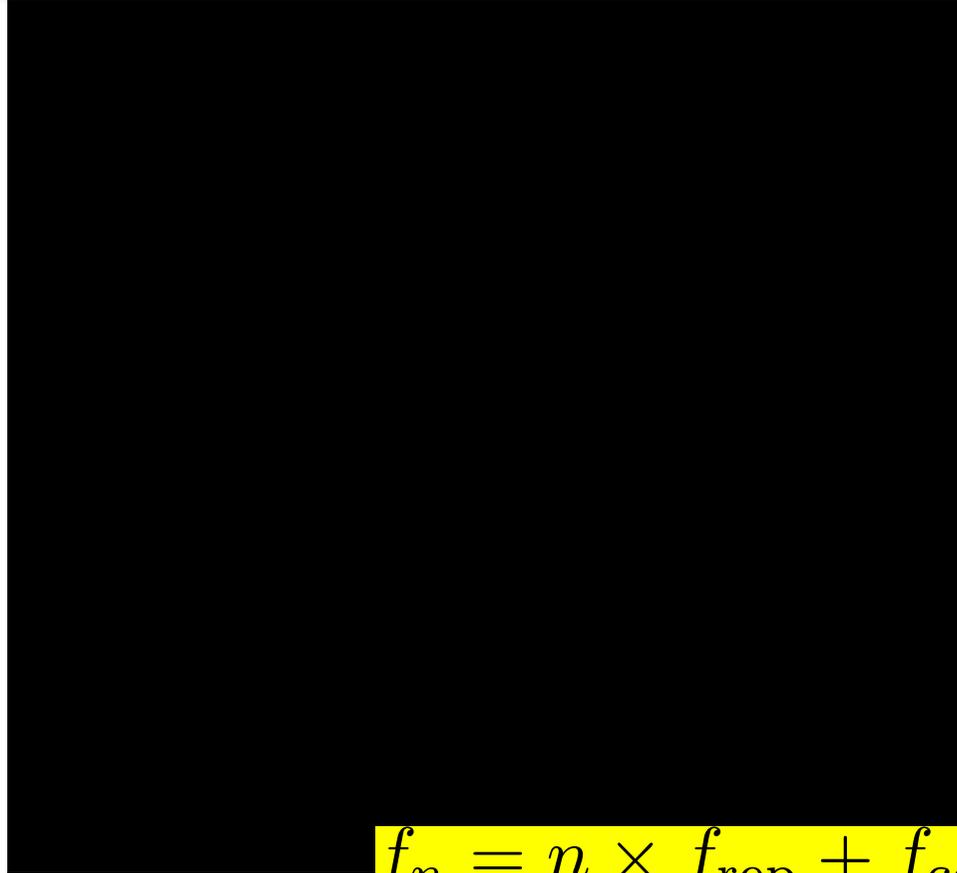
# 光周波数コムの本質

・フーリエ変換: 時間領域で等間隔なものは、周波数領域でも等間隔である



時間領域で  
継続する信号は  
周波数領域で  
細くなる

# 時間領域で制御されたモード同期レーザー = 光周波数コム



(2000).

時間領域では、  
規則正しく発せられる  
包絡線(envelope)と  
少しずつずれる搬送波(carrier)  
ずれ = carrier-envelope phase  
(CEP)

周波数領域では、  
繰り返し周波数ごとの等間隔な周  
波数が用意され、さらに  
それら全てに一定の周波数を加  
えたものになっている

ずれ = carrier-envelope offset  
(CEO)

$$f_n = n \times f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$$

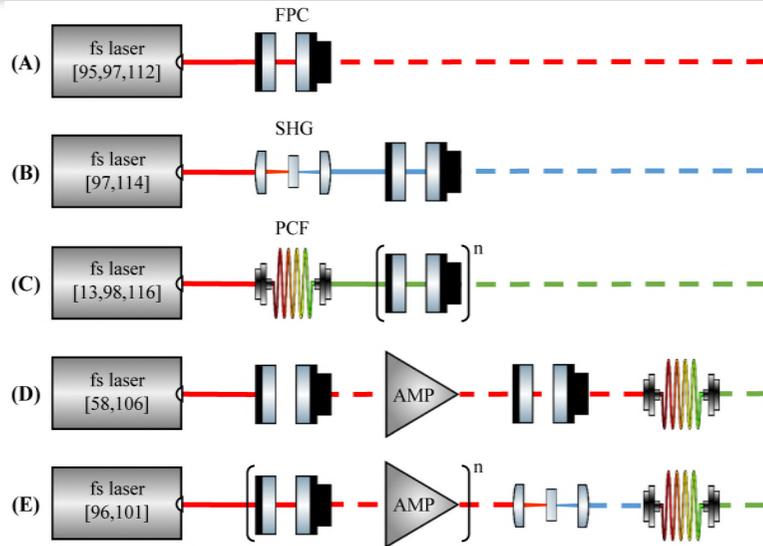
モード番号    繰り返し周波数    オフセット周波数

繰り返し周波数 $f_{\text{rep}}$ とオフセット周波数 $f_{\text{CEO}}$ という2つの周波数を特定するだけで、  
光領域の「櫛」の全ての周波数が既知となる。

光周波数コム(optical frequency comb)

特に、 $f_{\text{CEO}}$ と $f_{\text{rep}}$ (両方とも、測定・制御可能)が精緻に固定されていれば、  
光周波数の「ものさし」が用意されることになる！

# 天文コムとFabry-Perot共振器



コムへの要求

- ①視線速度の変化 1 cm/s  
500 nmにおいて20 kHzのシフト

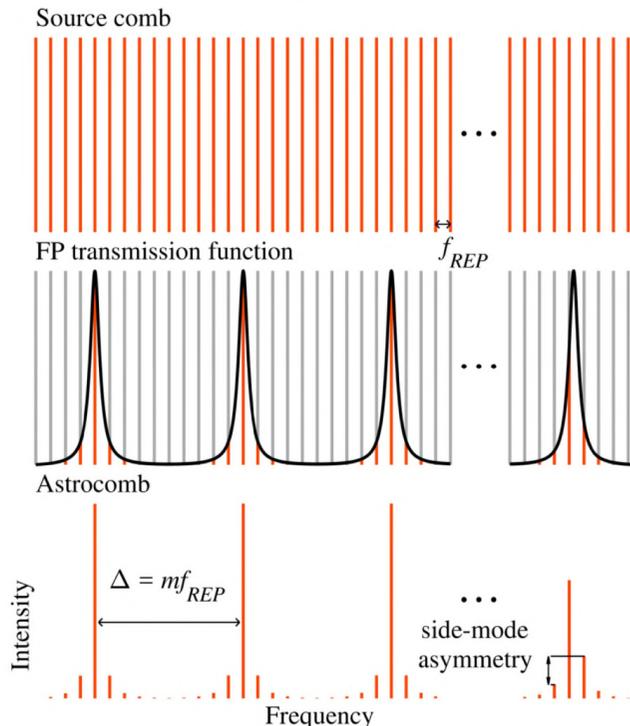
コムとしては、かなり簡単な数字

原子遷移にロックしたcwを基準にする(後述)  
または、 $f_{rep}$ と $f_{ceo}$ を国際周波数標準に同期

- ② $R=50,000$ , 500 nmで観測したいとすると  
 $\Delta f=12$  GHzなので、繰り返しは40 GHzくらい欲しい

Fabry-Perot共振器等による鋭い「間引き」が必要

- FP共振器の縦モード間隔が光周波数コムの繰り返し周波数の整数倍になる必要
- 10 cm/sの視線速度変化抽出にはSidemode suppression ratio  $10^{-4}$ が必要とされている



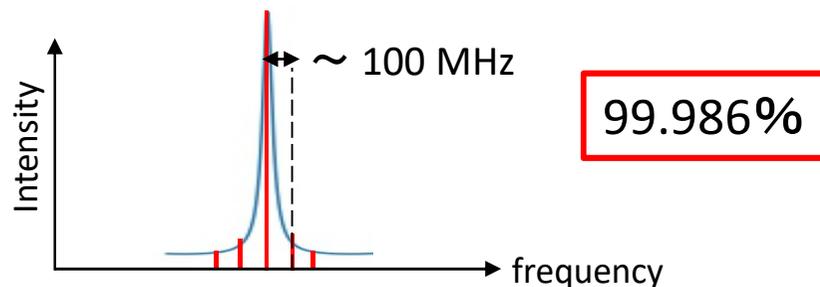
R. A. McCracken *et al.*, Opt. Exp. 25, 15058 (2017).

# 我々の設計方針：約40 GHzのコムを広帯域に用意したいとき

$f_{\text{rep}} \sim 100 \text{ MHz}$ のとき

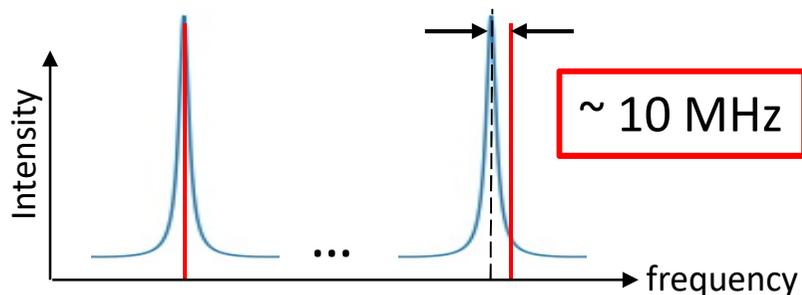
## ①フィルター

隣のモードとの強度比  $\sim 10^{-4}$ となる反射率



## ②広帯域性

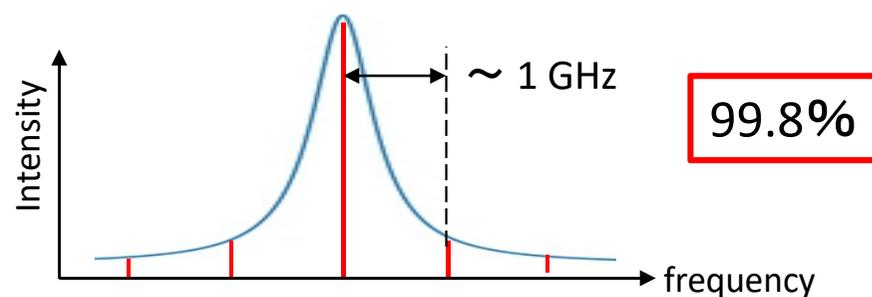
強度がピークの1%となるモードのずれ



$f_{\text{rep}} \sim 1 \text{ GHz}$ のとき

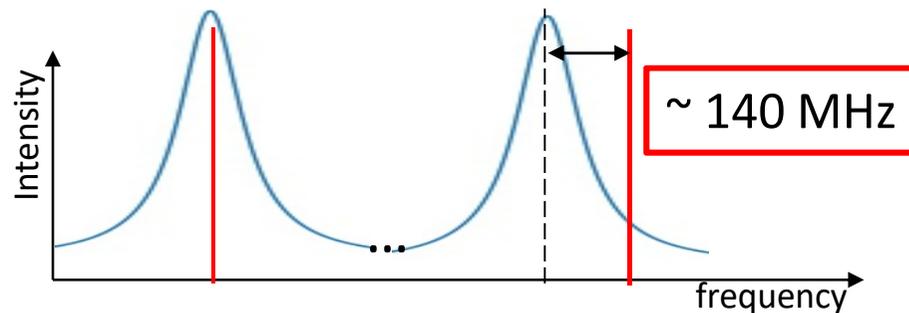
## ①フィルター

隣のモードとの強度比  $\sim 10^{-4}$ となる反射率



## ②広帯域性

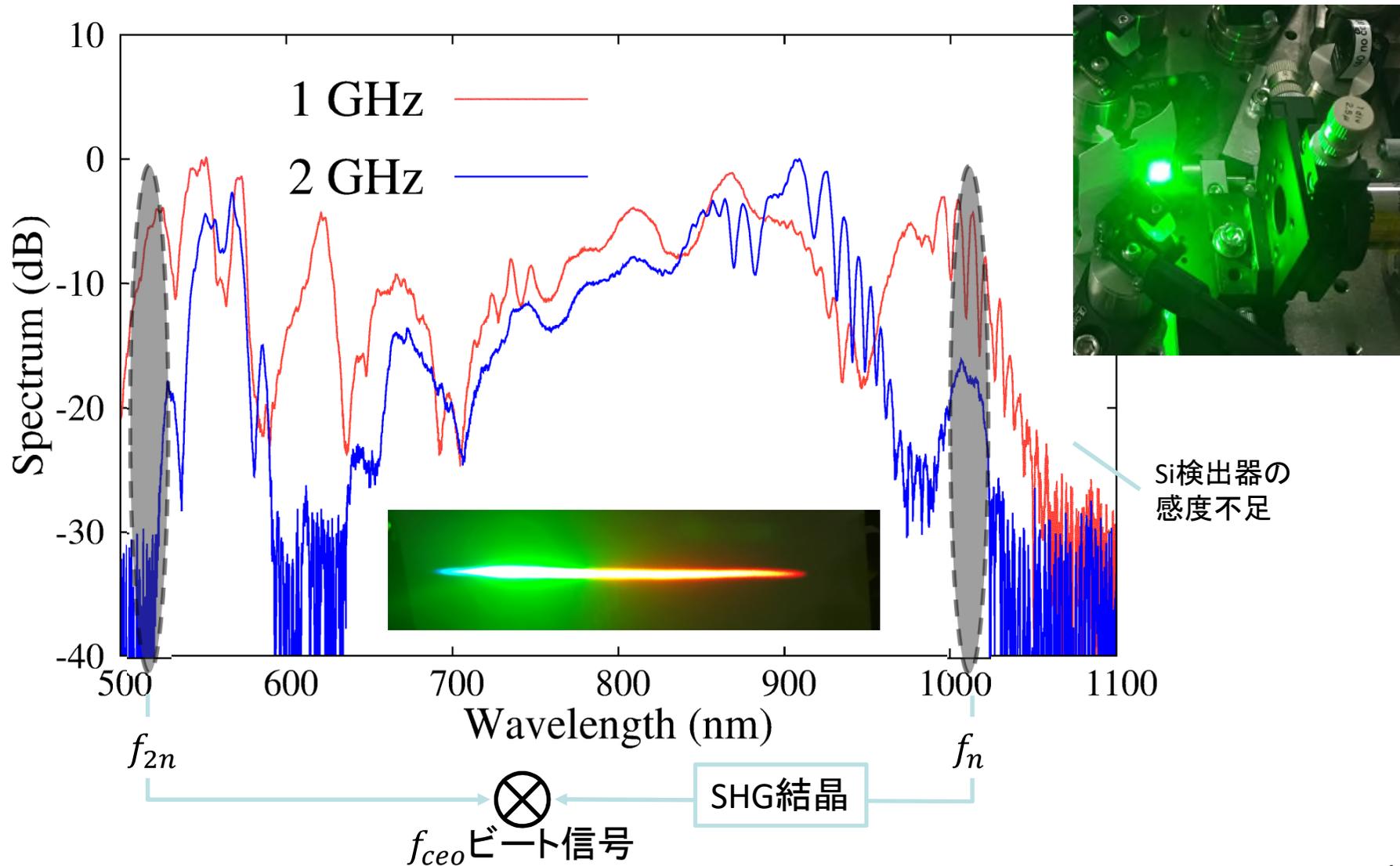
強度がピークの1%となるモードのずれ



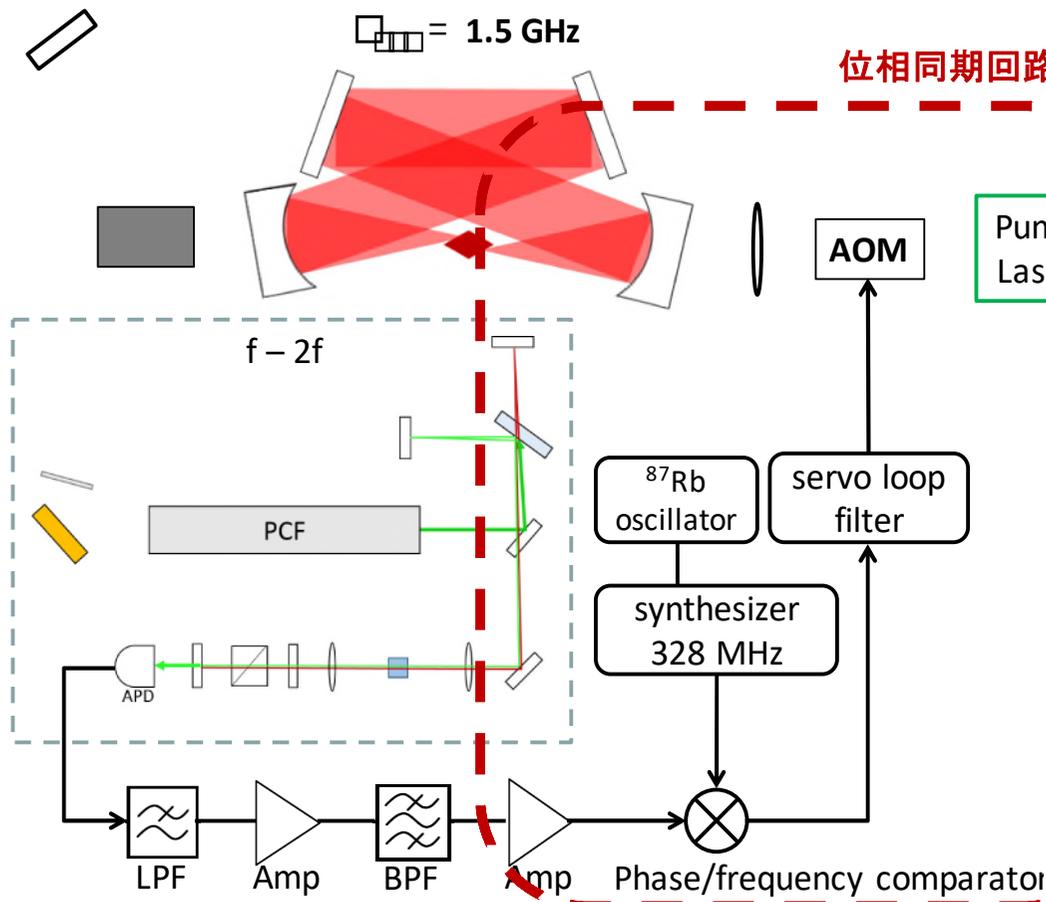
繰り返し周波数が高いTi:Sapphireコムを光源とし、ミラーの反射率を下げて分散に要求される条件を緩和し、広帯域な天文コムを目指す

# PCF(長さ10 cm)によるスペクトル拡大

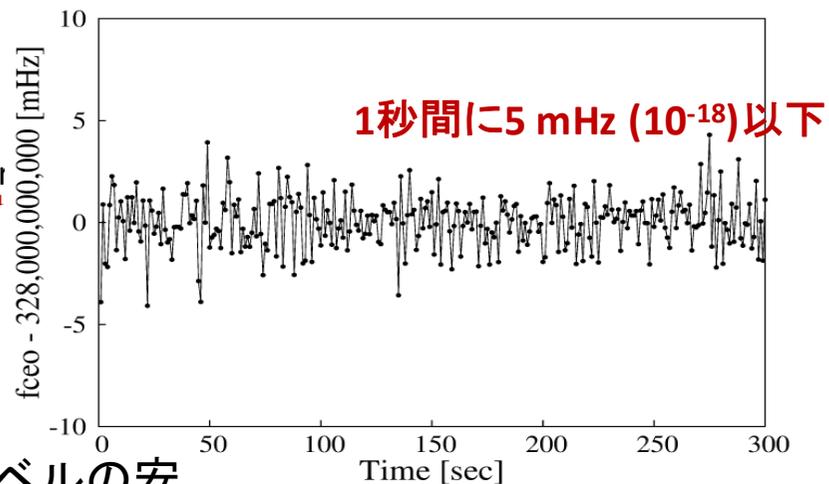
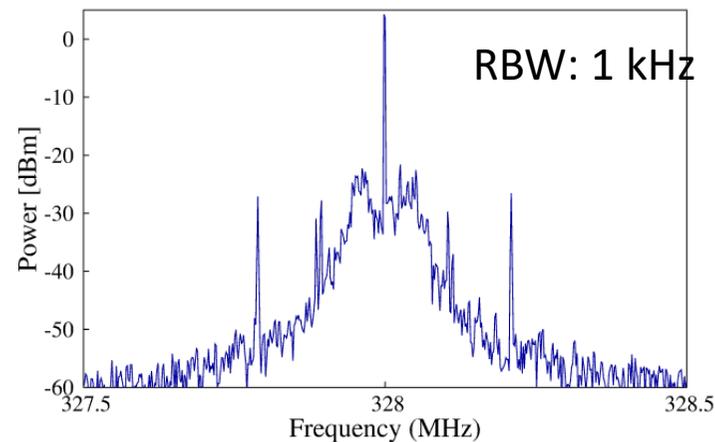
$f_{rep} = 1 \text{ GHz}, 2 \text{ GHz}$  における白色スペクトル (ポンプレーザーパワー: 5.5 W)



# オフセット周波数の安定化



天文コム用として  
最も高い繰り返し周波数



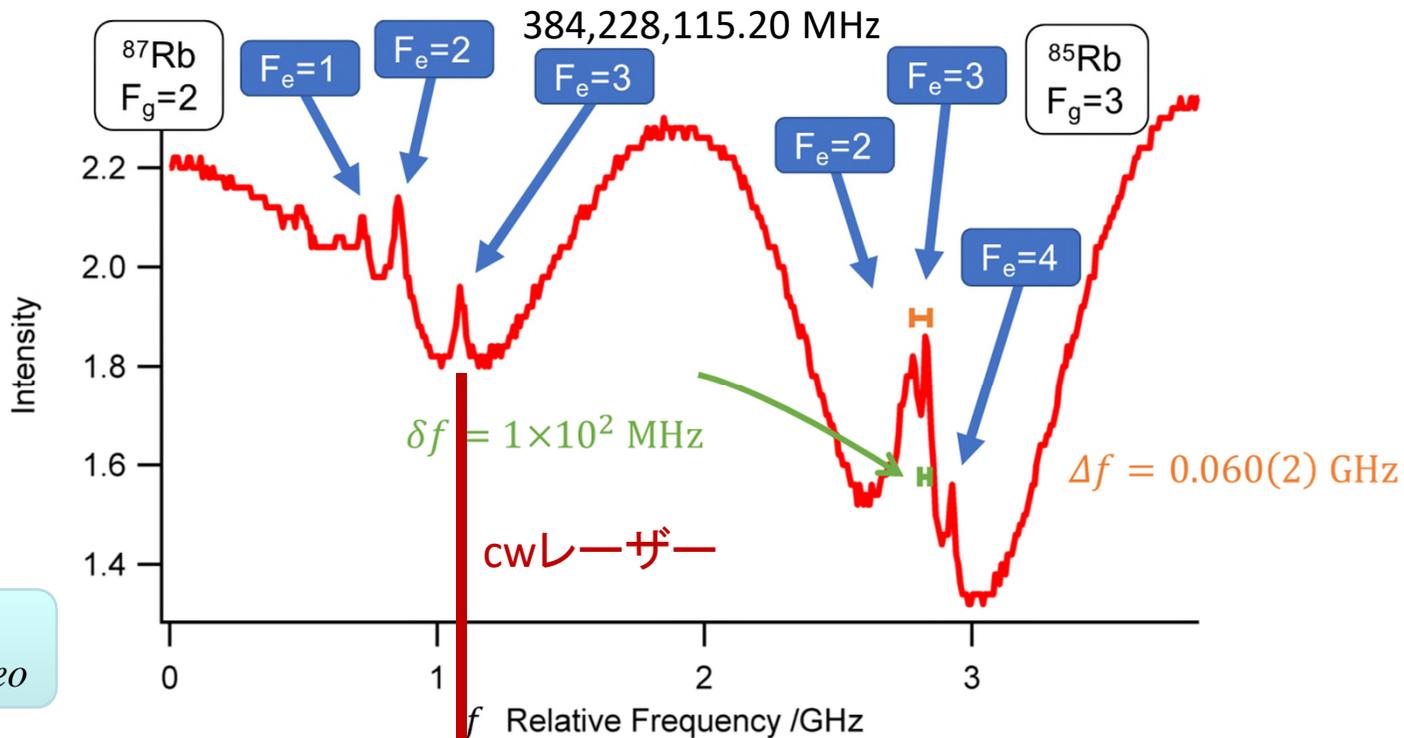
$$f_n = n \times f_{rep} + f_{ceo}$$

1秒積算あたりmHzレベルの安定度で固定できた

# 原子遷移に対するコム1本のロック

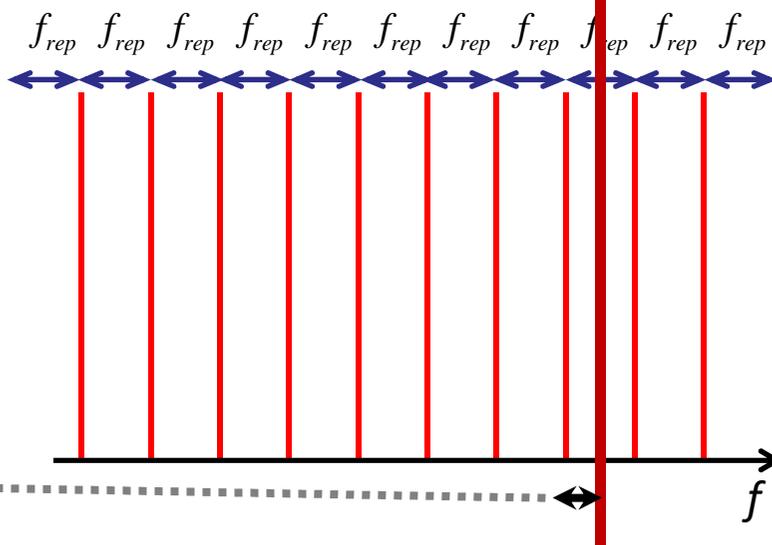
$^{87}\text{Rb}$ の  
飽和吸収スペクトル  
@ 780 nm

(線幅: 数MHz)



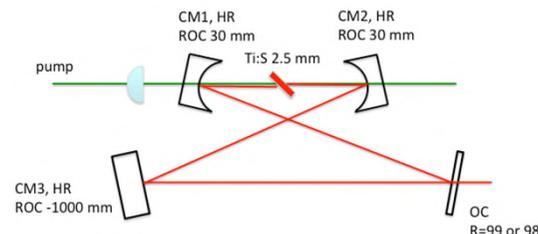
$$f_n = n \times f_{rep} + f_{ceo}$$

数10kHzの線幅  
で固定



- ・原子遷移にロックしたcwレーザー
- ・コム1本

周波数差が一定になるように  
レーザー共振器長を制御

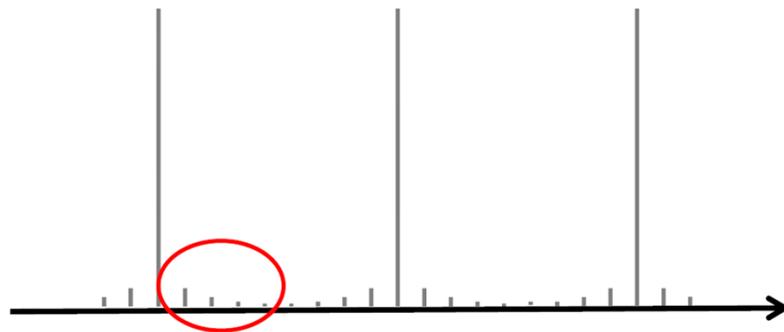


# モードフィルタリング共振器

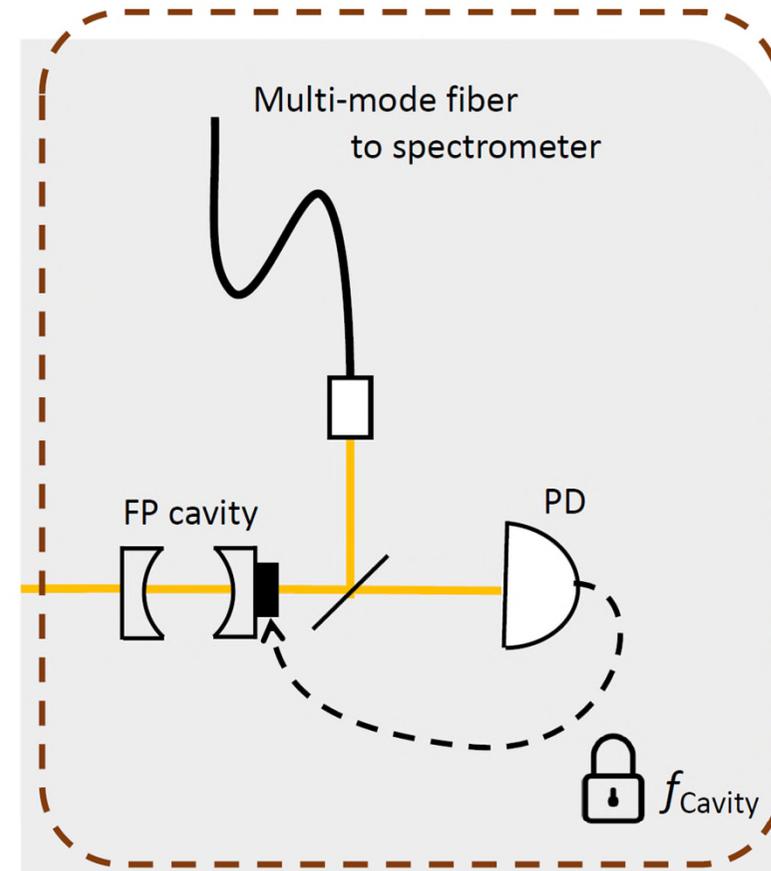
## FP cavity for mode-selection

- Free spectral range  $f_{\text{cavity}}$ : 43.2 GHz  
=  $27 \times f_{\text{rep}}$  of the comb
- 99.5% reflection 420 – 700 nm

当時、急ぎ入手可能で $R=99.8\%$ に近い $R=99.5\%$ の分散補償ミラーを用いて原理検証実験を行った。



Suppress as much as possible



# 共振器内での位相変化: $\phi = \phi_{\text{air}} + \phi_{\text{mirror}} + \phi_{\text{gouy}}$

$\phi_{\text{air}}$ : 空気中の伝搬による位相変化

$$\phi_{\text{air}} = 2kn(\lambda)L = 2\frac{2\pi}{\lambda}n(\lambda)L$$

$L$ : ミラー間距離

$n(\lambda)$ : 空気の屈折率

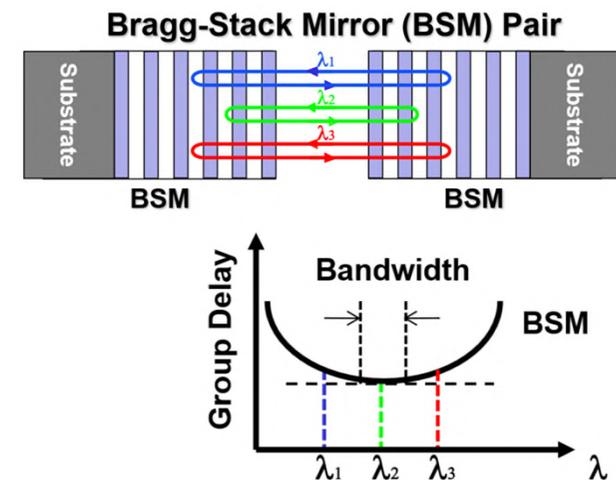
$\phi_{\text{mirror}}$ : ミラー反射時に生じる位相変化

群遅延(Group Delay, GD) [s]:  $GD = \frac{\partial \phi}{\partial \omega}$

群遅延分散(Group Delay Dispersion, GDD) [ $s^2$ ]:  $GDD = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega^2}$

$$\phi_{\text{mirror}}(\omega) = \int_{\omega_0}^{\omega} GD(\omega') d\omega'$$

$$\phi_{\text{mirror}}(\lambda) = -2\pi c \int_{\lambda_0}^{\lambda} GD(\lambda') \frac{1}{\lambda^2} d\lambda'$$

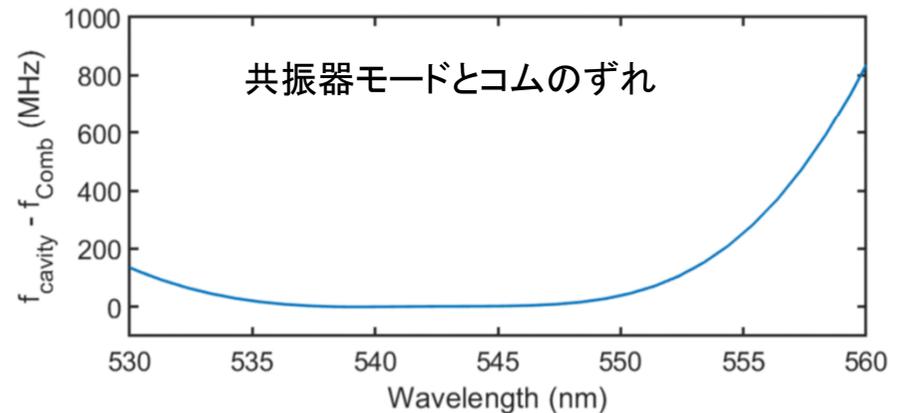
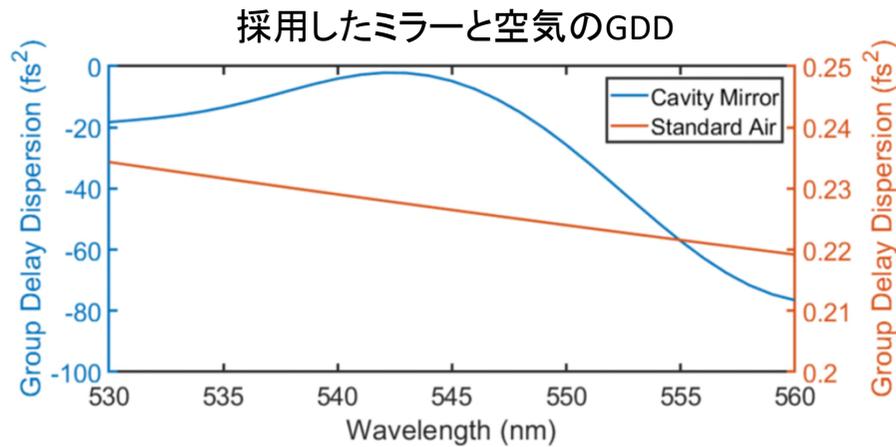


Li-Jin Chen, et. al., OPTICS EXPRESS vol.18, 23205(2010).

$\phi_{\text{gouy}}$ : 空間モードに依存した位相変化

$$\phi_{\text{gouy}} = -2 \tan^{-1} \sqrt{L/(2R - L)} \quad (R: \text{ミラーの曲率半径})$$

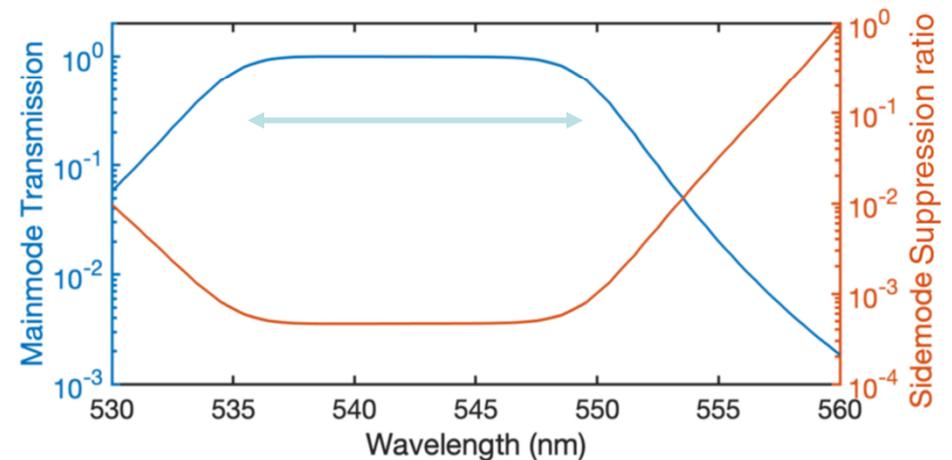
# Fabry-Perot共振器用ミラーの分散



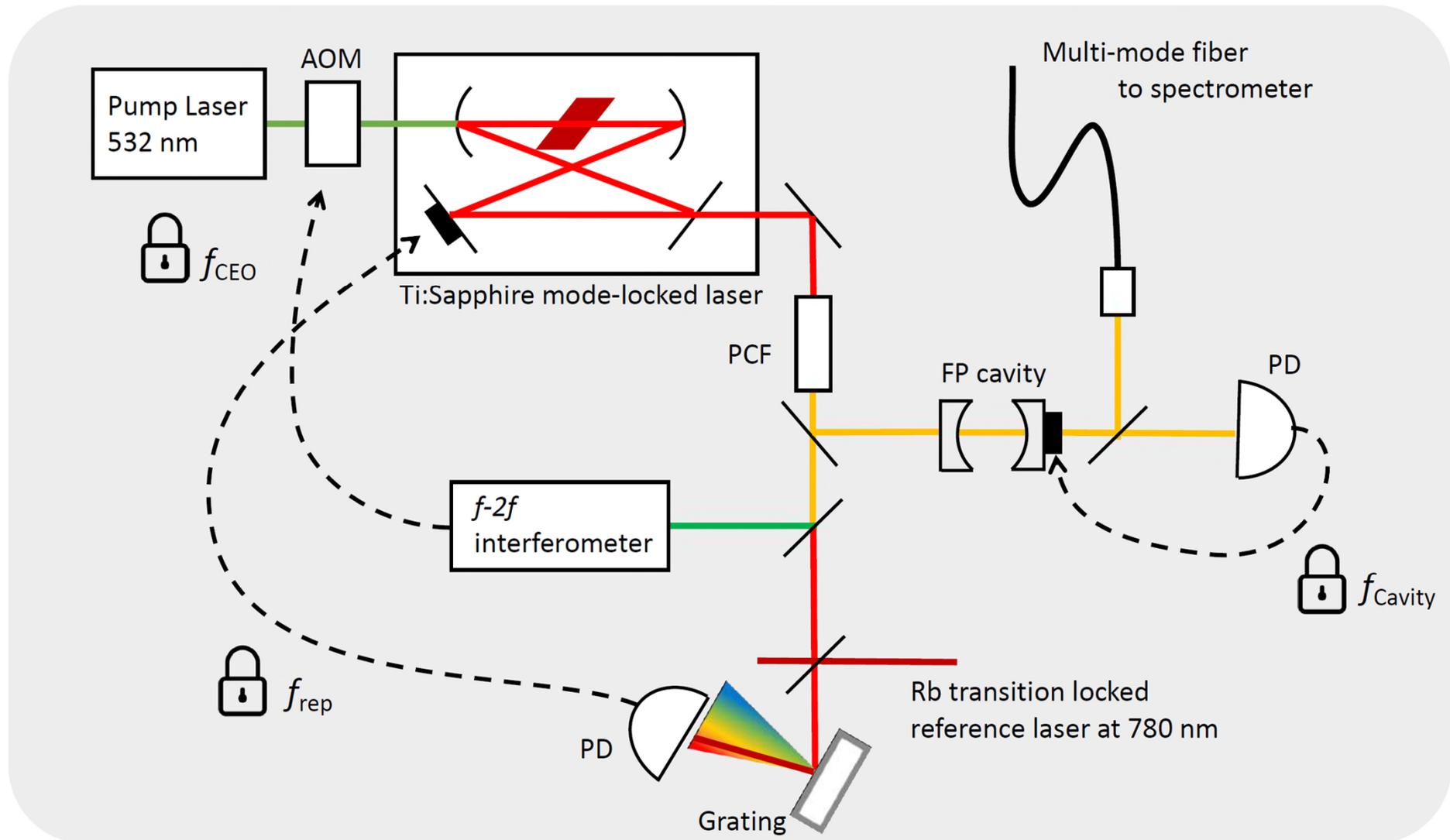
天文コムとして理想的な性能が期待できる  
波長帯は、535-550 nm付近(15.3 THz幅)

透過率>70%、サイドモード抑圧比 $5 \times 10^{-4}$

RV 10 cm/sに必要なのは $1 \times 10^{-4}$



# 製作した天文コムの概要



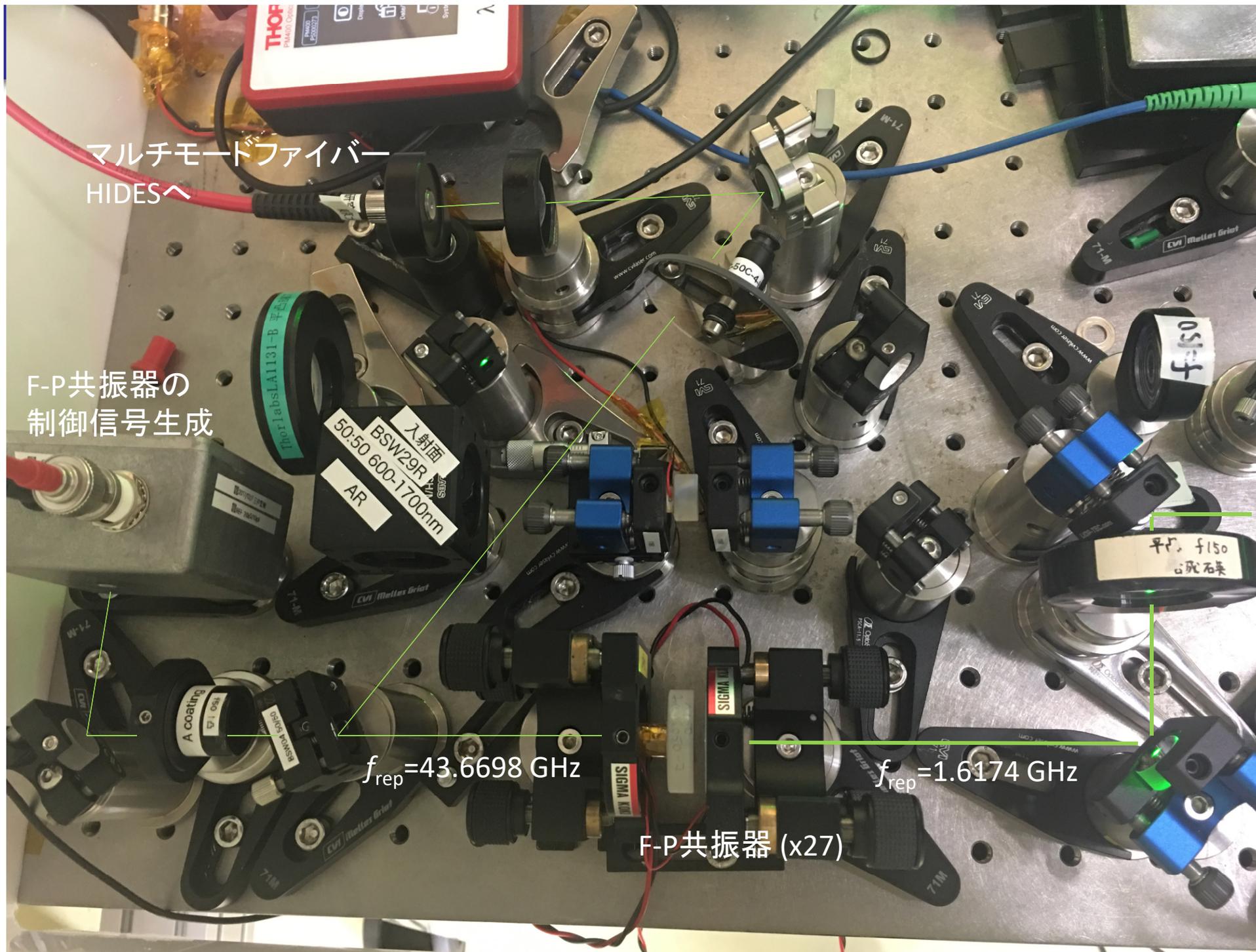
マルチモードファイバー  
HIDESへ

F-P共振器の  
制御信号生成

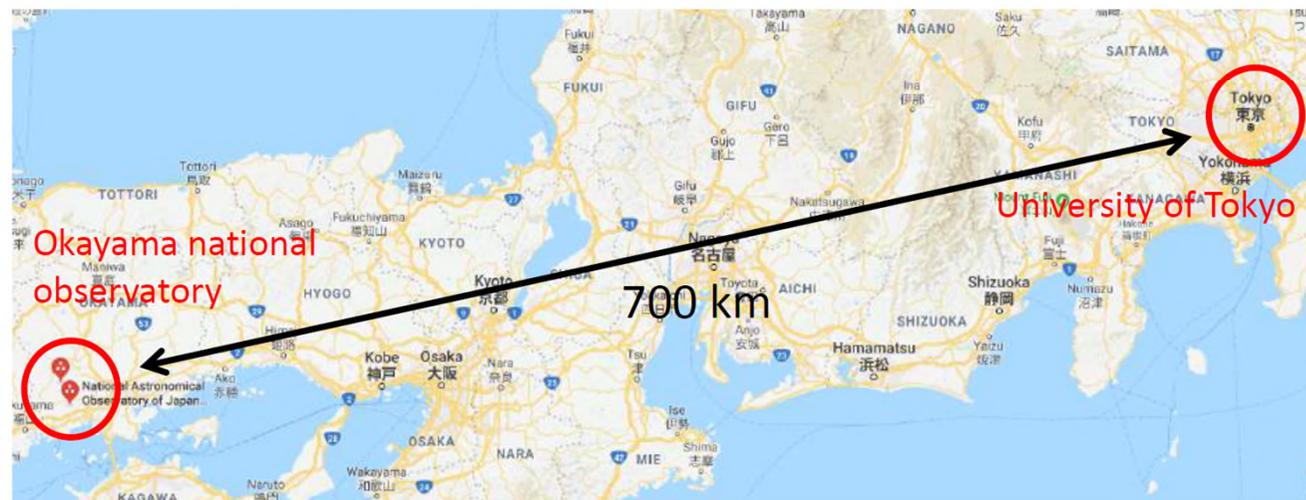
$f_{\text{rep}} = 43.6698 \text{ GHz}$

$f_{\text{rep}} = 1.6174 \text{ GHz}$

F-P共振器 (x27)



# 188 cm望遠鏡における実地試験



188 cm telescope (the largest in Japan currently)  
HIDES (High Dispersion Echelle Spectrograph)

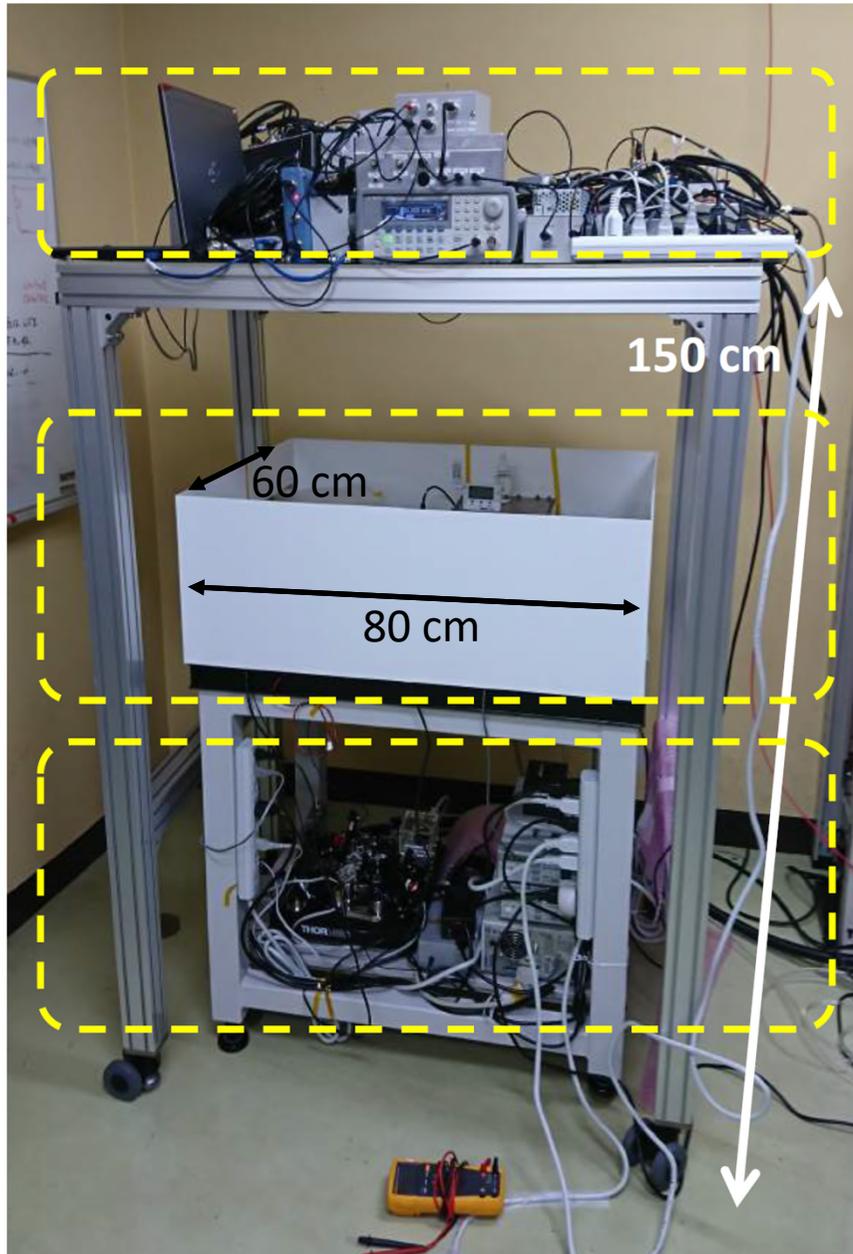
Wavelength range: 360 – 1000 nm  
(Simultaneous observation range: 115 nm)  
Resolution: 5 – 10 GHz  
1 pixel ~ 2.5 GHz at 550 nm

2017.12.04-06:  
Transport & installation  
2017.12.13-16:  
Adjustments & observations

# 移設の様子



# 寸法

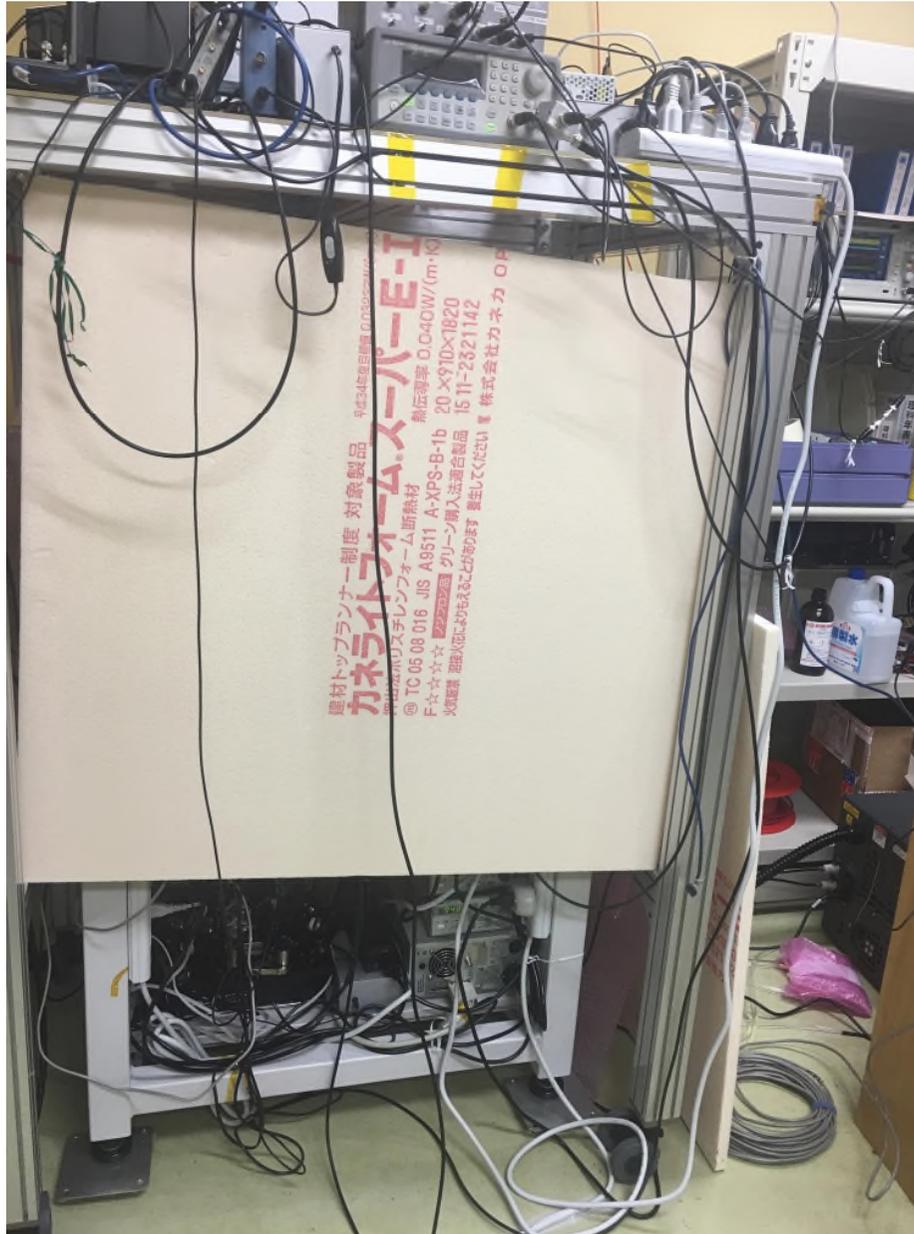


Electronics for stabilization

Optical frequency comb  
+ FP cavity

CW laser locked to Rb transition

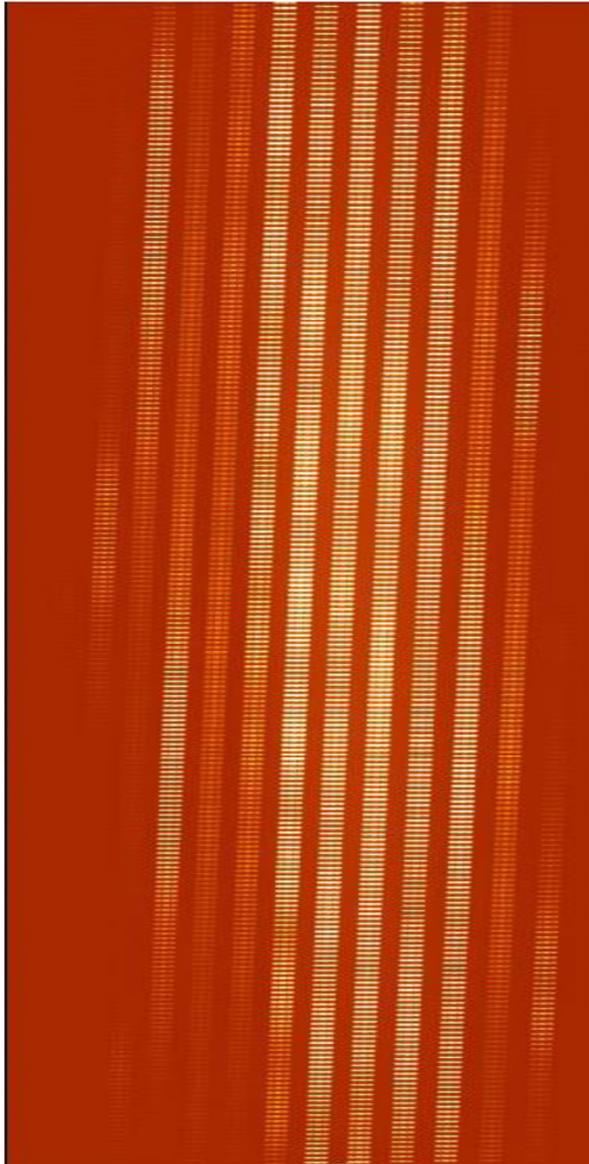
# 実測中の様子



ドームが動く際の振動と音が  
周波数コム of 能動的安定化に影響

# HIDESで観測した緑色コム

Raw data acquired by spectrometer

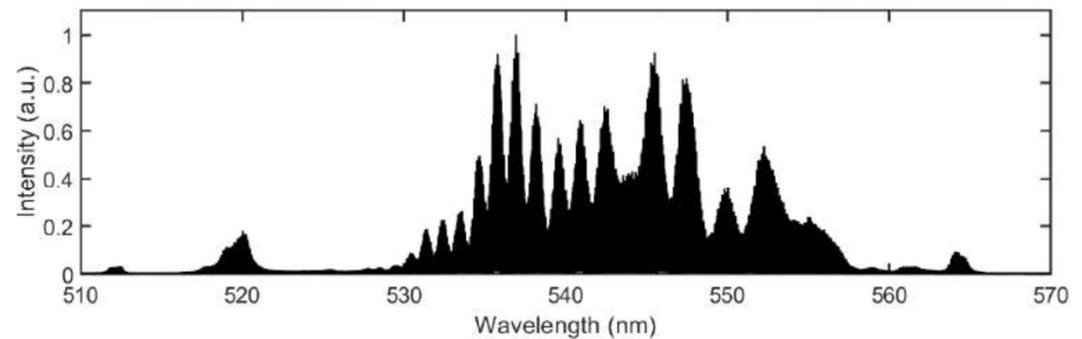


High efficiency fiber-link (HE mode)  
 $\lambda/\Delta\lambda=52,000$

露光時間1秒、50秒間隔で取得

- Each mode is well resolved
- Uneven brightness for each mode
- Wavelength range: 530 – 560 nm

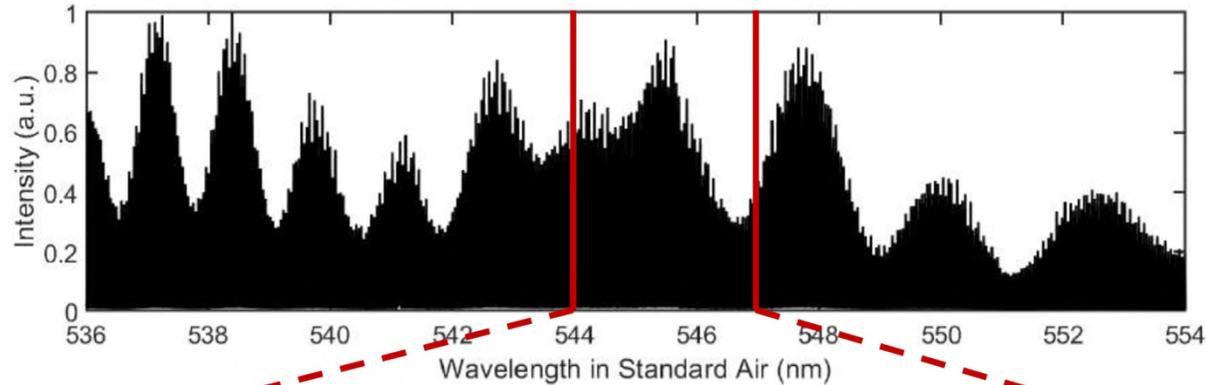
Spectrum of the astro-comb



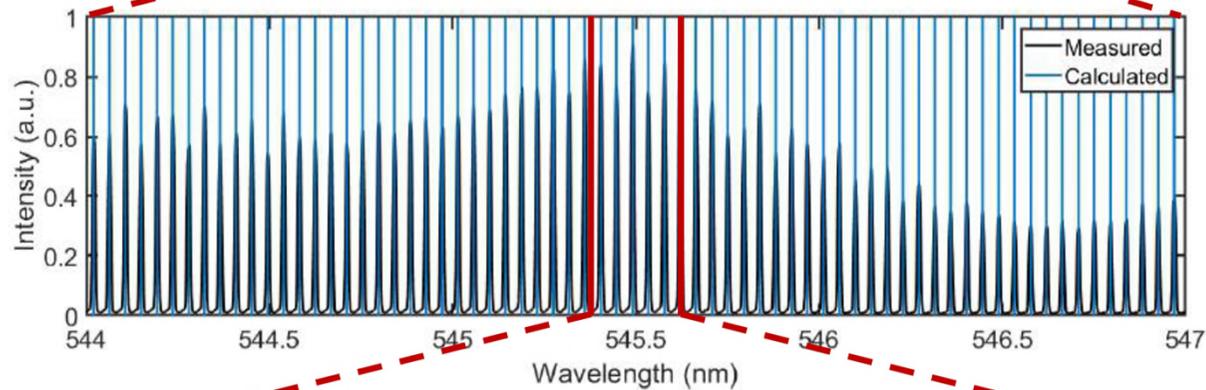
# 波長校正性能の評価

Spectrum of the astro-comb

E. Chae *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **38**, A1 (2021).

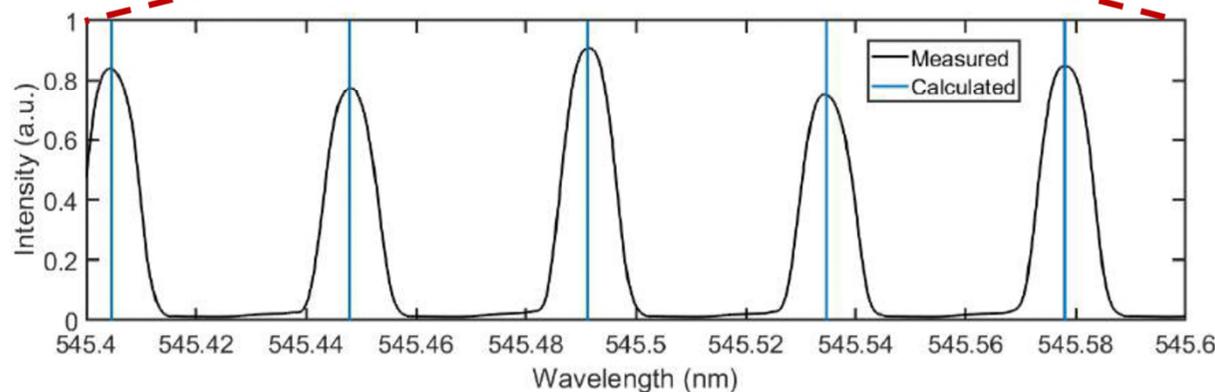


測定開始直前にTh-Arでピクセルと波長の対応付け(横軸)



青線は天文コムから計算される波長  
相対的には1/10ピクセルのずれ  
(150 m/s相当)

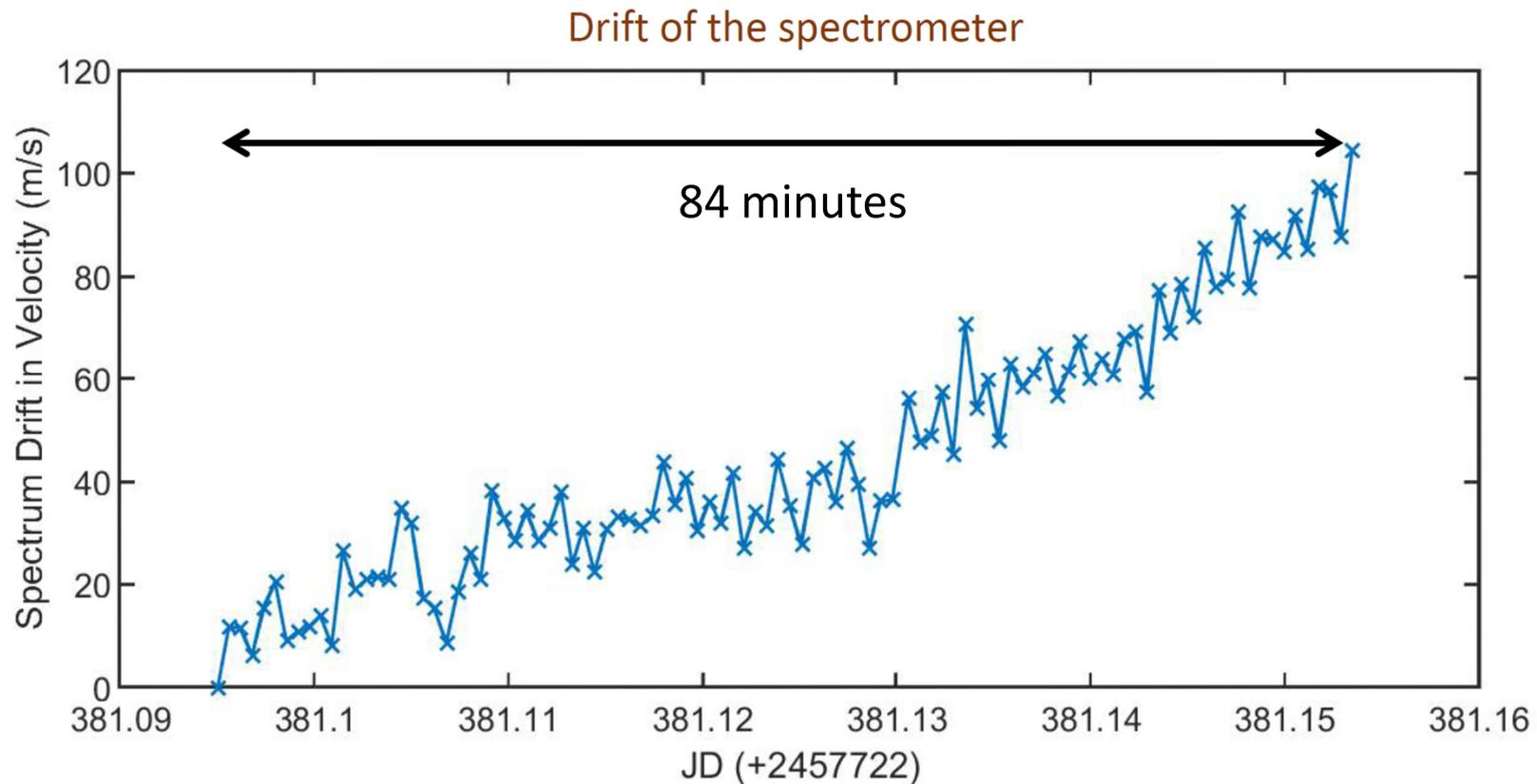
3.6 Å 毎に分割して評価した  
51セグメント分のRMSは10 m/s  
従って、RVの精度は**1.4 m/s**



使用可能な波長域が10倍(184 nm)になるとRVの精度は**50 cm/s**より良いことになる

# 露光間の変動の評価

E. Chae *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **38**, A1 (2021).



$\sigma = 8$  m/s using 536-554 nm range

Distortion of the lineshape profile  
fiber modal noise

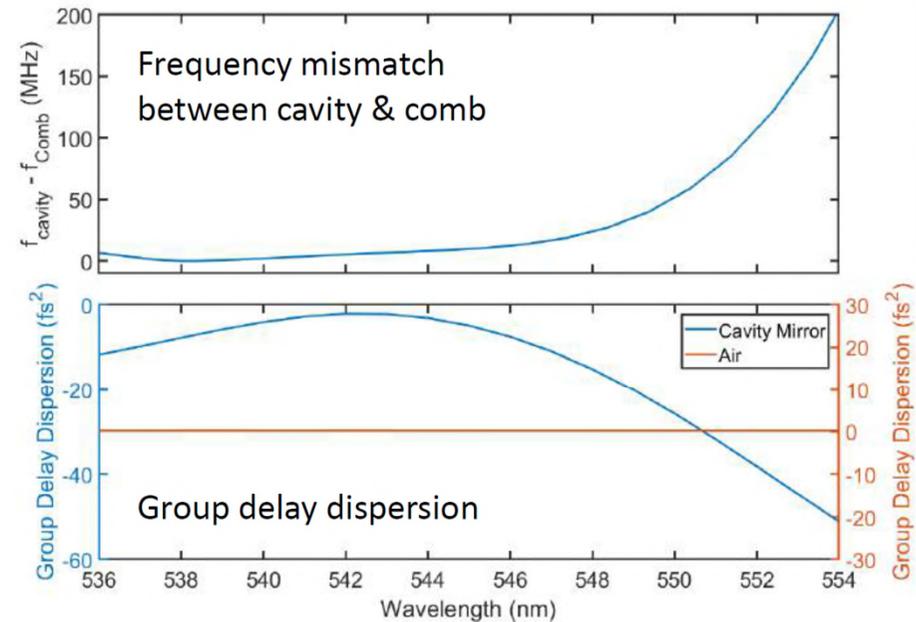
(HEモードでの観測での典型値は $\sigma \sim$ 数10 m/s)

# 改善すべき項目

## Better cavity mirrors

- Deviation of the cavity's FSR from multiples of the comb's  $f_{\text{rep}}$  due to uncompensated group delay dispersion

→ Design better FP cavity mirrors

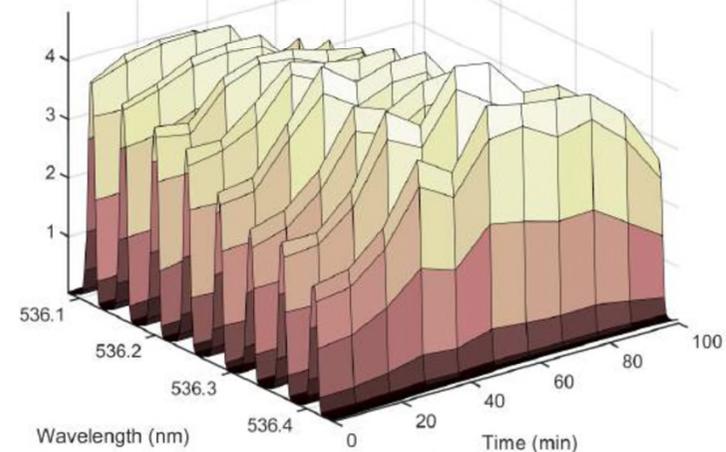


## Mode-scrambler for multi-mode fiber

- Variation of the intensity for each mode

→ Employ a mode-scrambler for the multi-mode fiber to the spectrometer.

Temporal change of the intensity of each mode



# ホローコアファイバーの進展

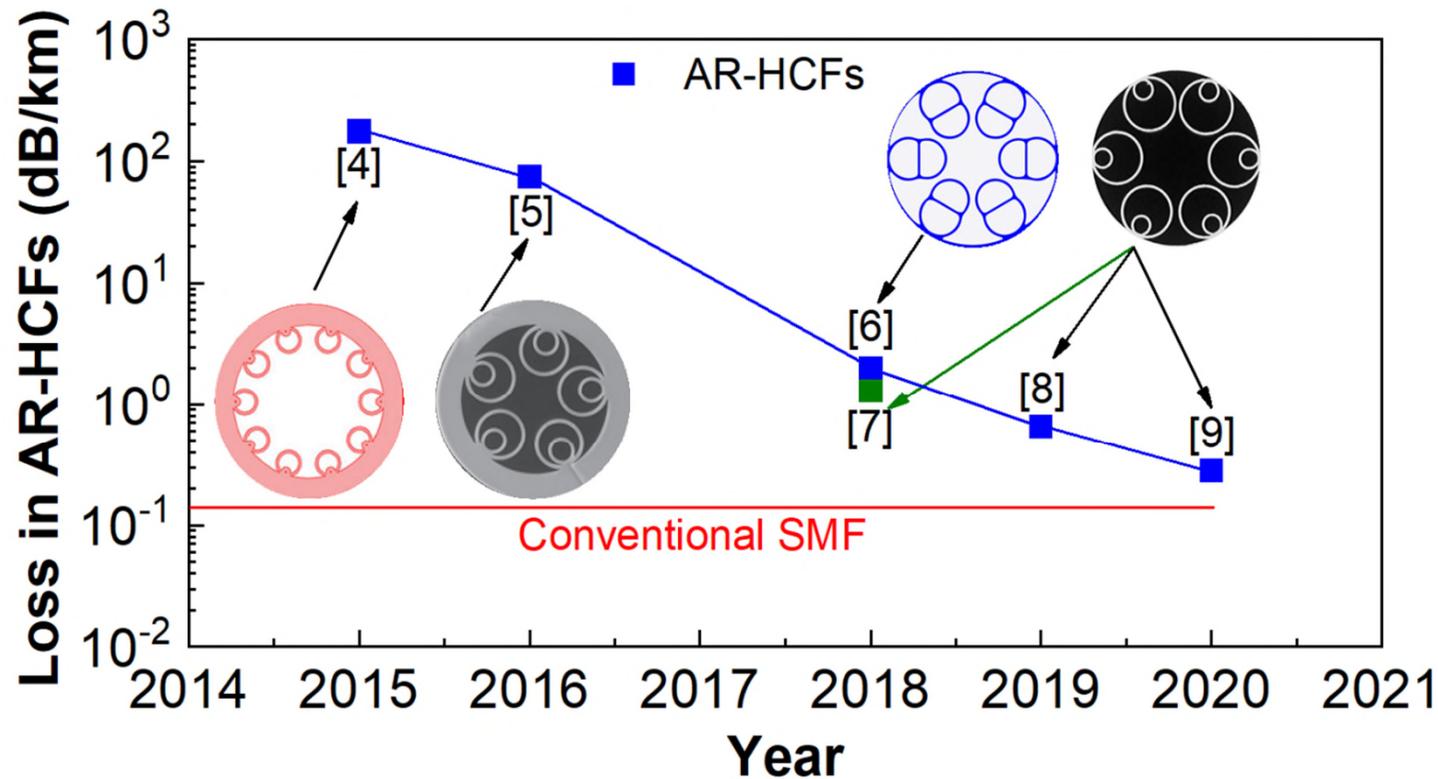


Figure 1. Transmission loss of AR-HCFs in different years.

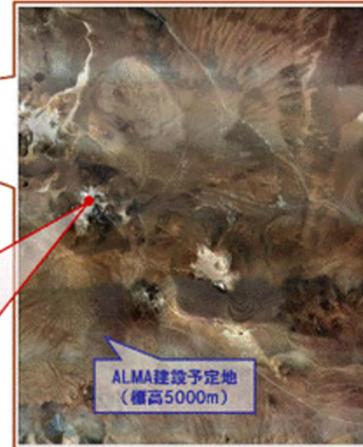
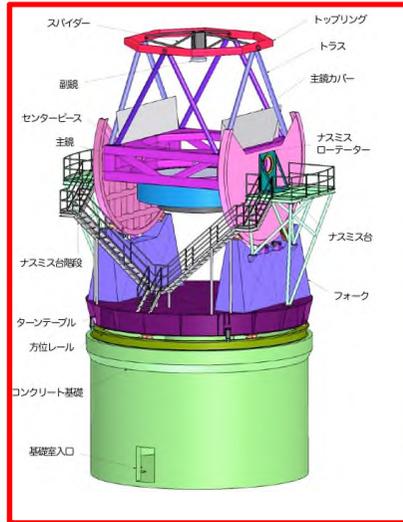
W. Ni *et al.*, *Photonics* **8**, 128 (2021).

ファイバーの製造技術の向上によってAnti-resonant hollow-core fiberの概念が実用化、単一横モード、大コア径のファイバーの透過ロスが激減している。

マルチモードファイバーのモードスクランブラーが不要になる??

# TARdYSのためのYバンド天文コムへの拡張

## TAO 6.5 m望遠鏡

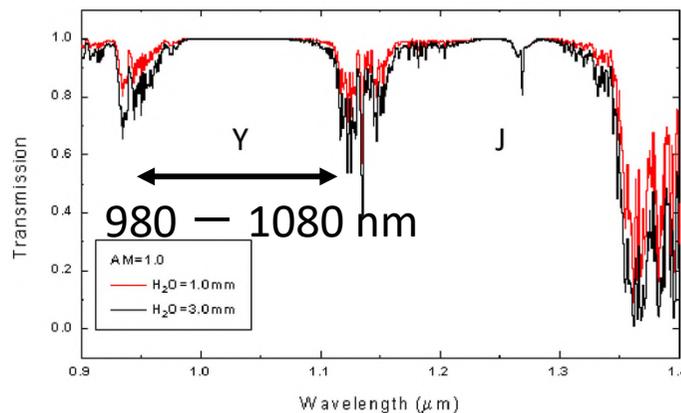


- ・標高5600 m
- ・水蒸気が少ない
- ・晴天率が高い

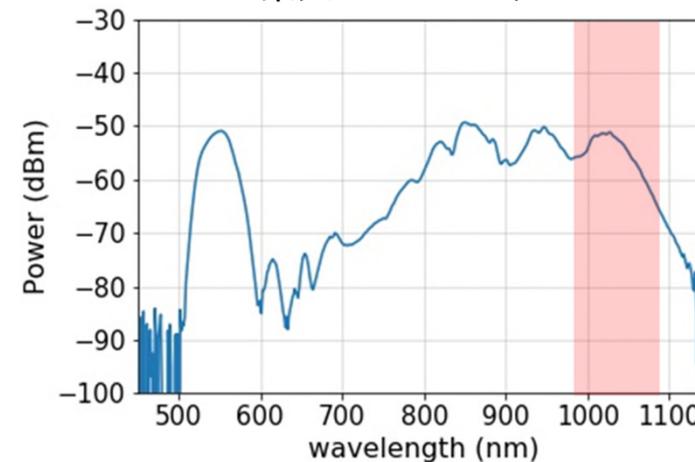
<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/intro/image/map.gif>

## TARdYS : Tao Aiugraphic high Resolution (d) Y band Spectrograph

- ・分解能:  $R = \lambda / \Delta\lambda > 50,000$
- ・対象: Yバンド(980 – 1080 nm)



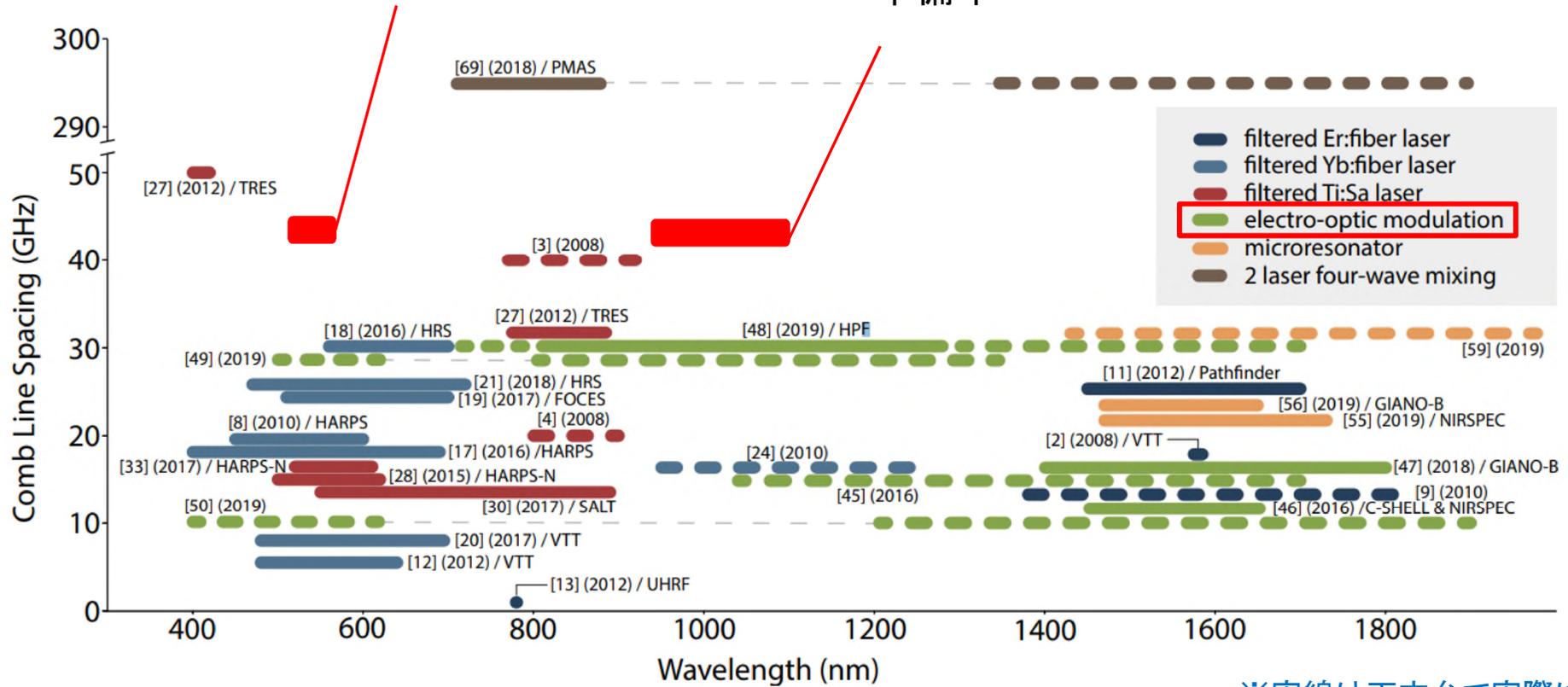
東大コムのスペクトル



# EOコムとマイクロコム-フィルタ共振器を使わない方向性

(2021)/HIDES 実験は2017.12  
 E. Chae et al., J. Opt. Soc. Am. B **38**, A1 (2021).

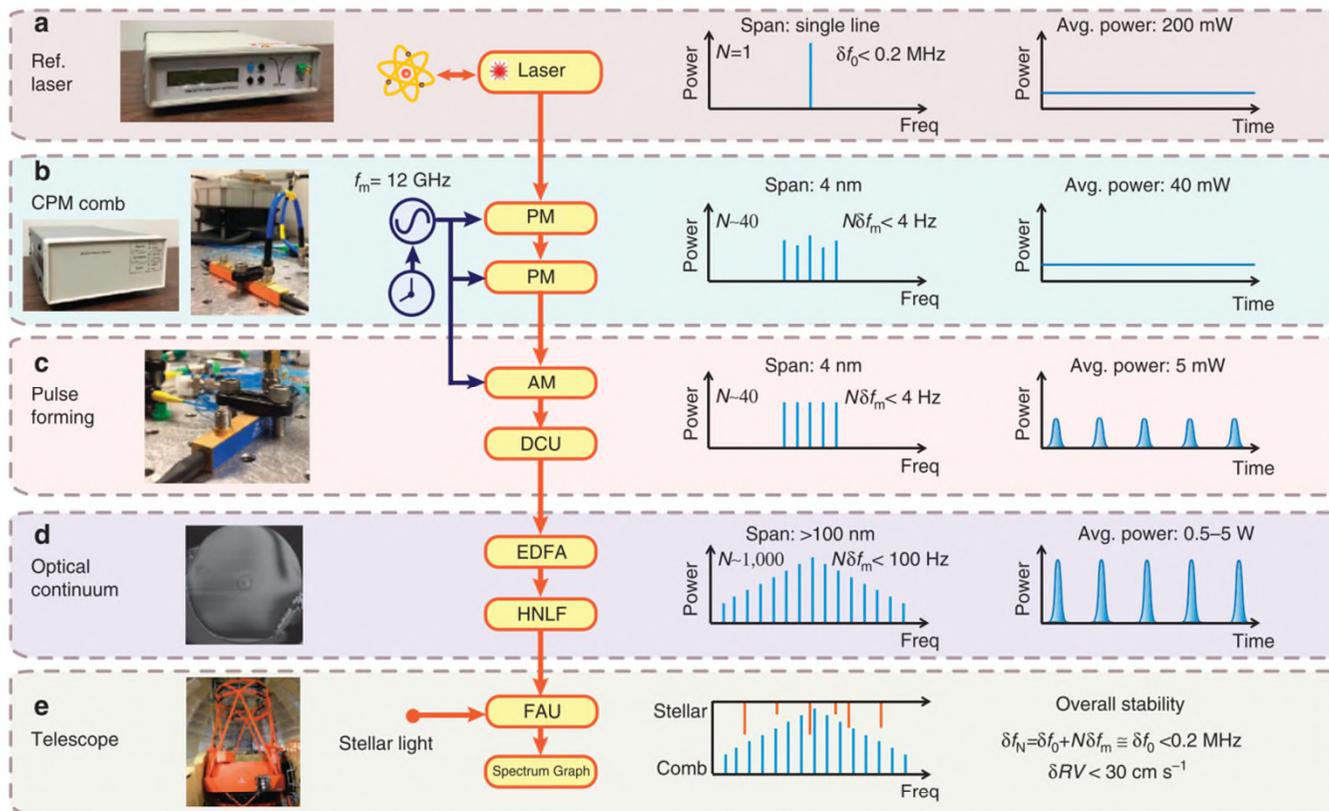
Yバンド全域、RV 10 cm/s対応  
 準備中



T. Herr et al., IEEE Photon. Tech. Lett. **31** 1890 (2019)

※実線は天文台で実際に  
 テストされたもの

# EOコム

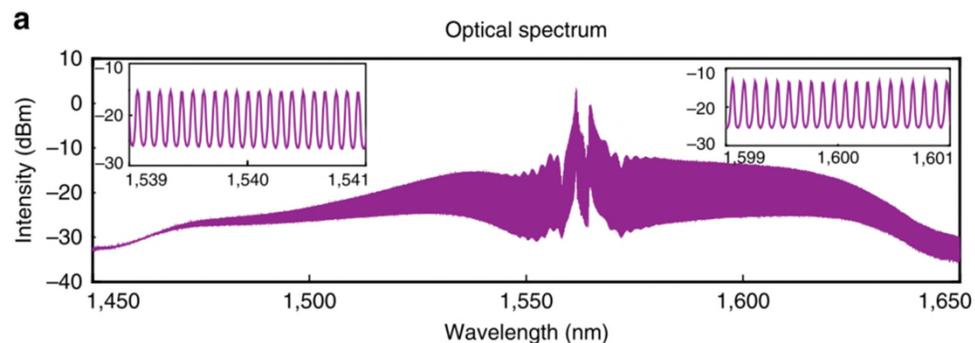


光周波数が安定な  
単一周波数レーザーを用意

電気光学変調器で  
サイドバンドを形成

各モードの振幅を整え、  
位相を合わせると  
モード同期レーザーと等価に

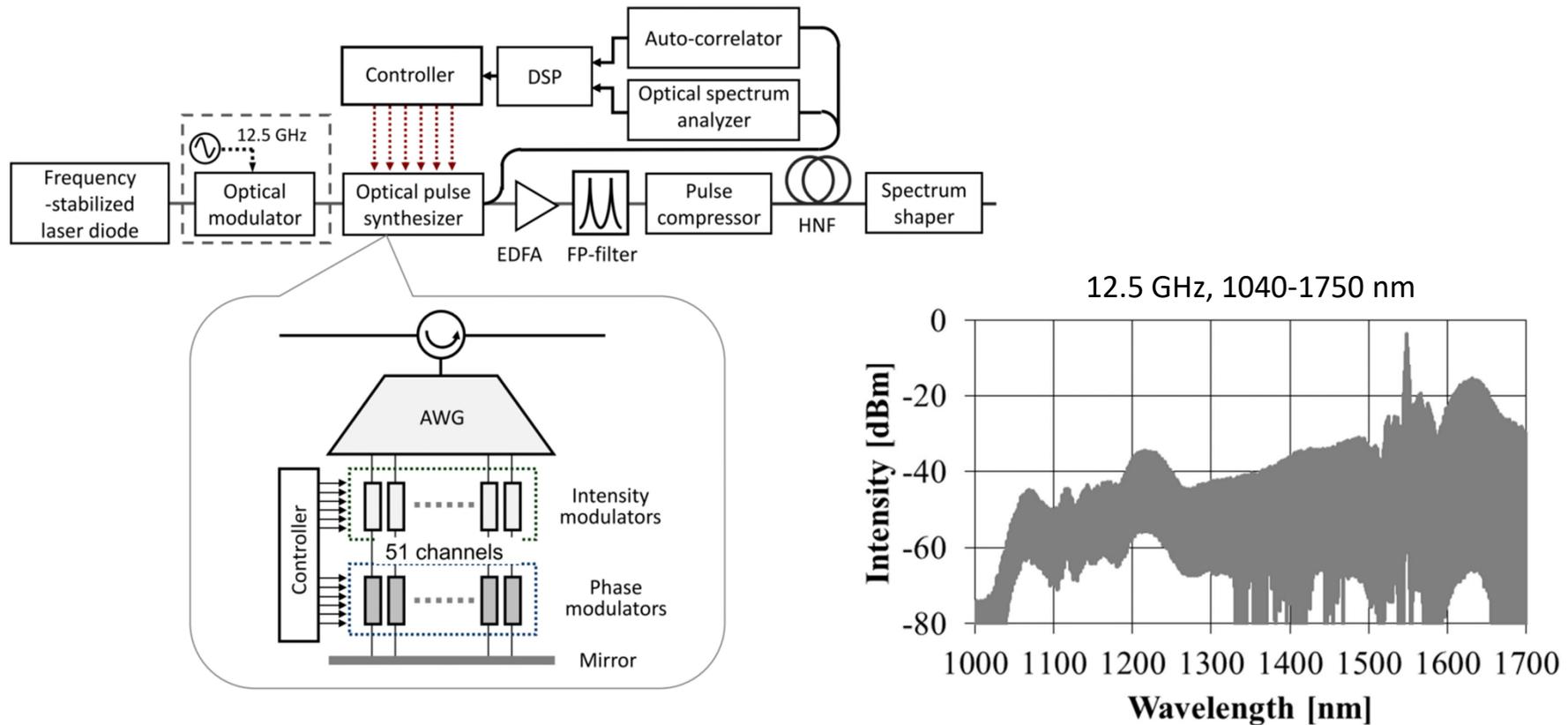
増幅し、非線形ファイバーで  
広帯域化



単一縦モードレーザーの光周波数の安定度  
電気光学変調器の駆動周波数の位相雑音の小ささが  
周波数コムとしての性能を決める。

光周波数の線幅が太くても良い分光器校正の意味  
では、両者に究極を求めなくて良いとみられる。

# IRDで使用されているEOコム

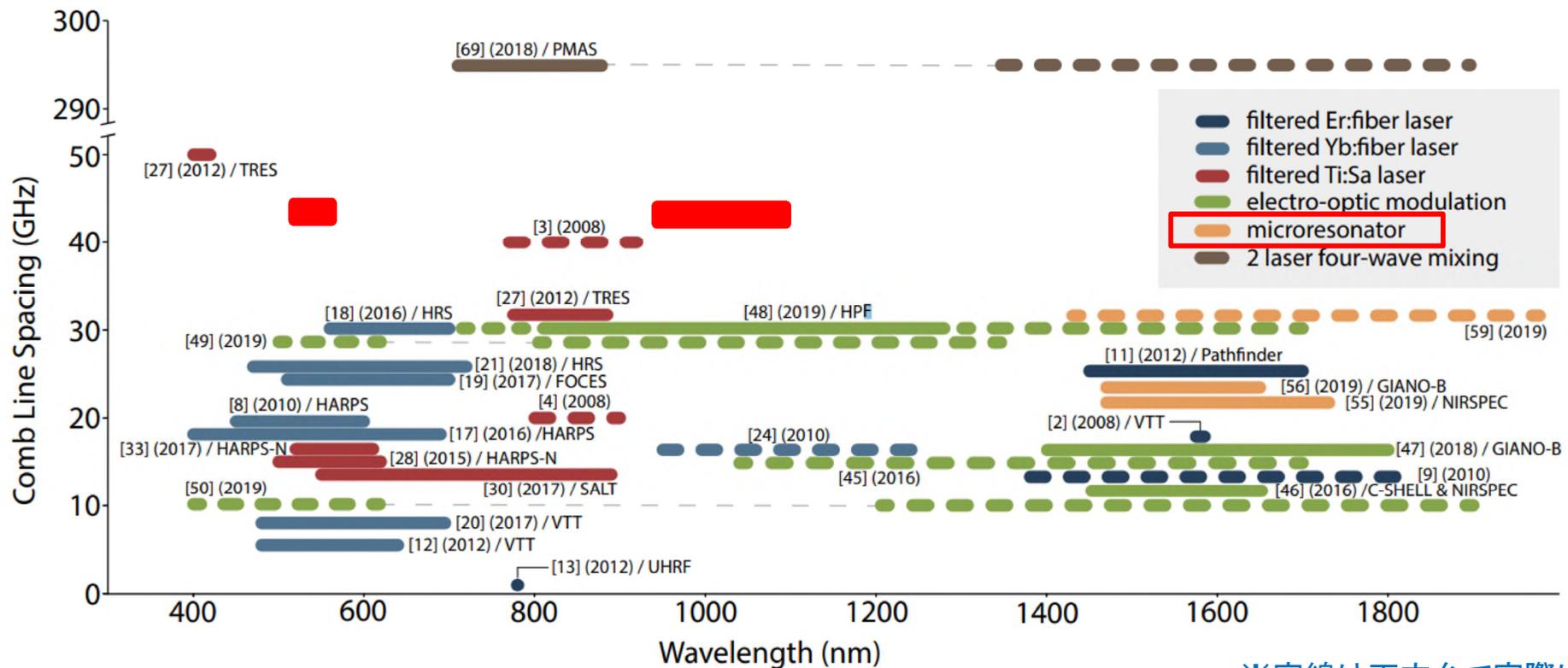


T. Kokubo *et al.*, Proc. SPIE **9912**, 99121R (2016).

EOコムは、モード同期を失う恐れがないのが大きなメリットの一つ  
また、通信波長帯で信頼性の高い部品を利用可能:波長安定化レーザーや高速変調器

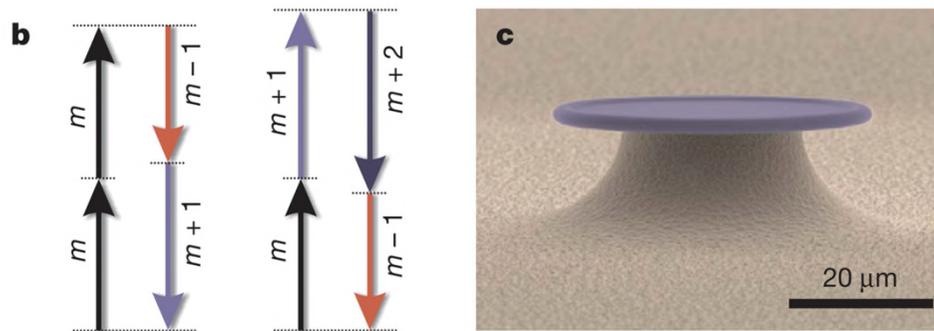
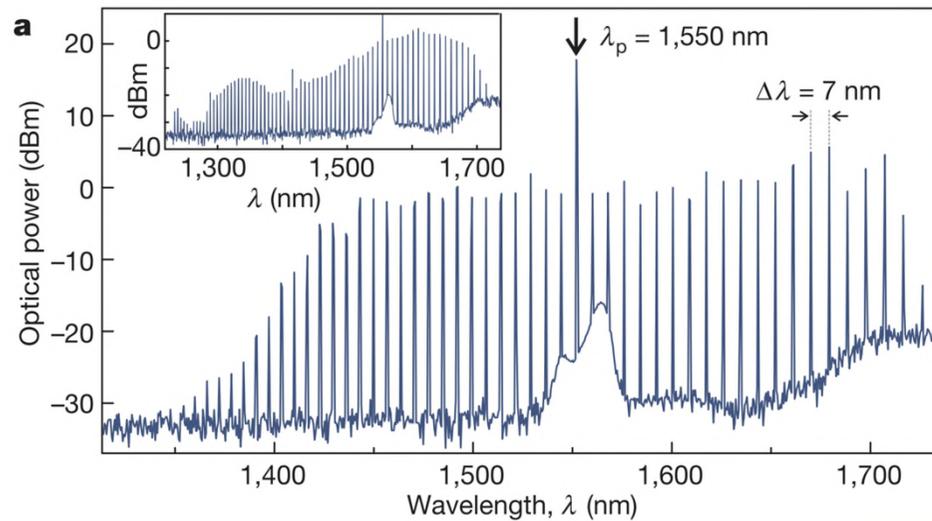
最初の位相変調の際の周波数純度が命。繰り返しの正確さもこれで決まる。  
可視領域への拡張は凝った構成が必要になる。

# EOコムとマイクロコム-フィルタ共振器を使わない方向性



T. Herr *et al.*, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **31** 1890 (2019) ※実線は天文台で実際にテストされたもの

# マイクロコムが登場(2007)



P. Del'Haye *et al.*, Nature **450**, 1214 (2007).

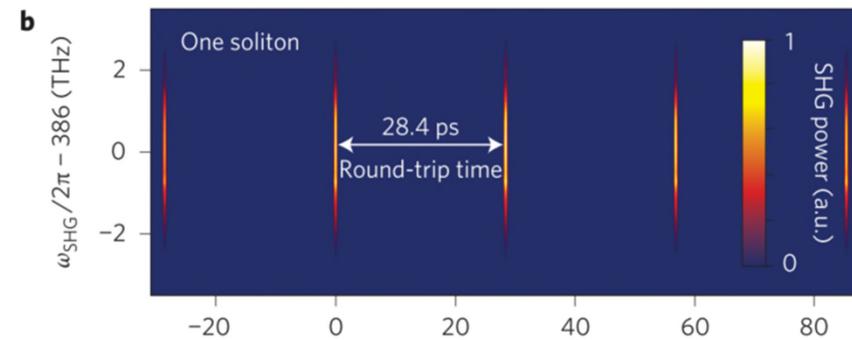
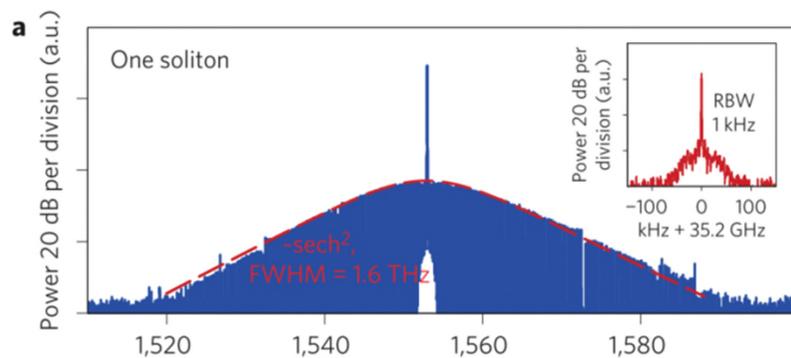
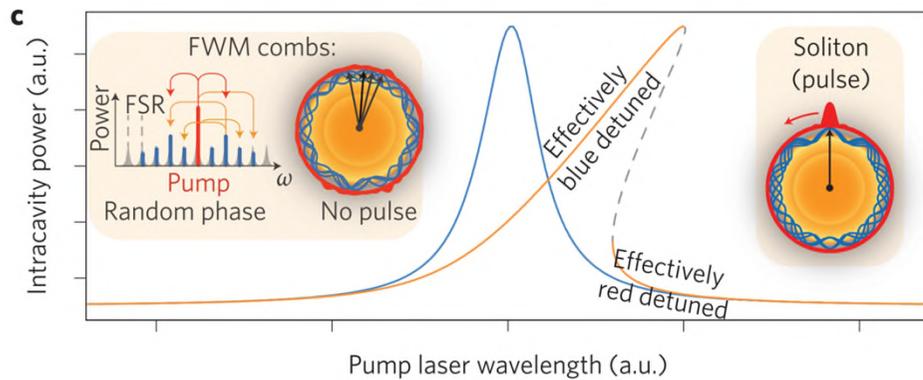
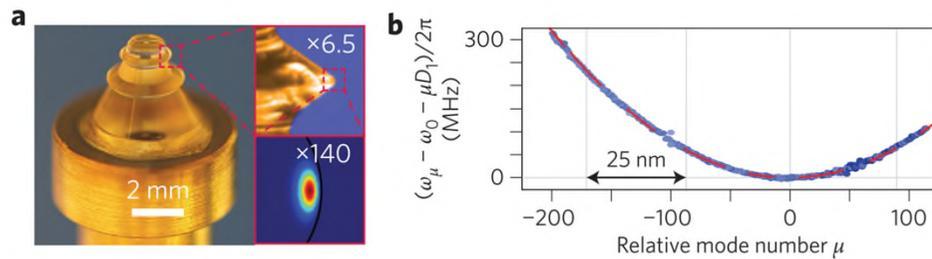
シリカの超高Q( $10^8$ )共振器中に  
単一縦モードレーザーを蓄積する

高い光強度となり、媒質の非線形性による  
四光波混合がカスケード的に生じる

共振器の幾何学的分散と、  
シリカの $>1.3 \mu\text{m}$ における異常分散が  
打ち消し合い、等間隔な縦モードが用意され  
広帯域に信号が形成される

モード間の相対位相は固定されているものの、  
揃っていないため、  
時間領域ではパルスではない。

# ソリトン動作の発見(2013)



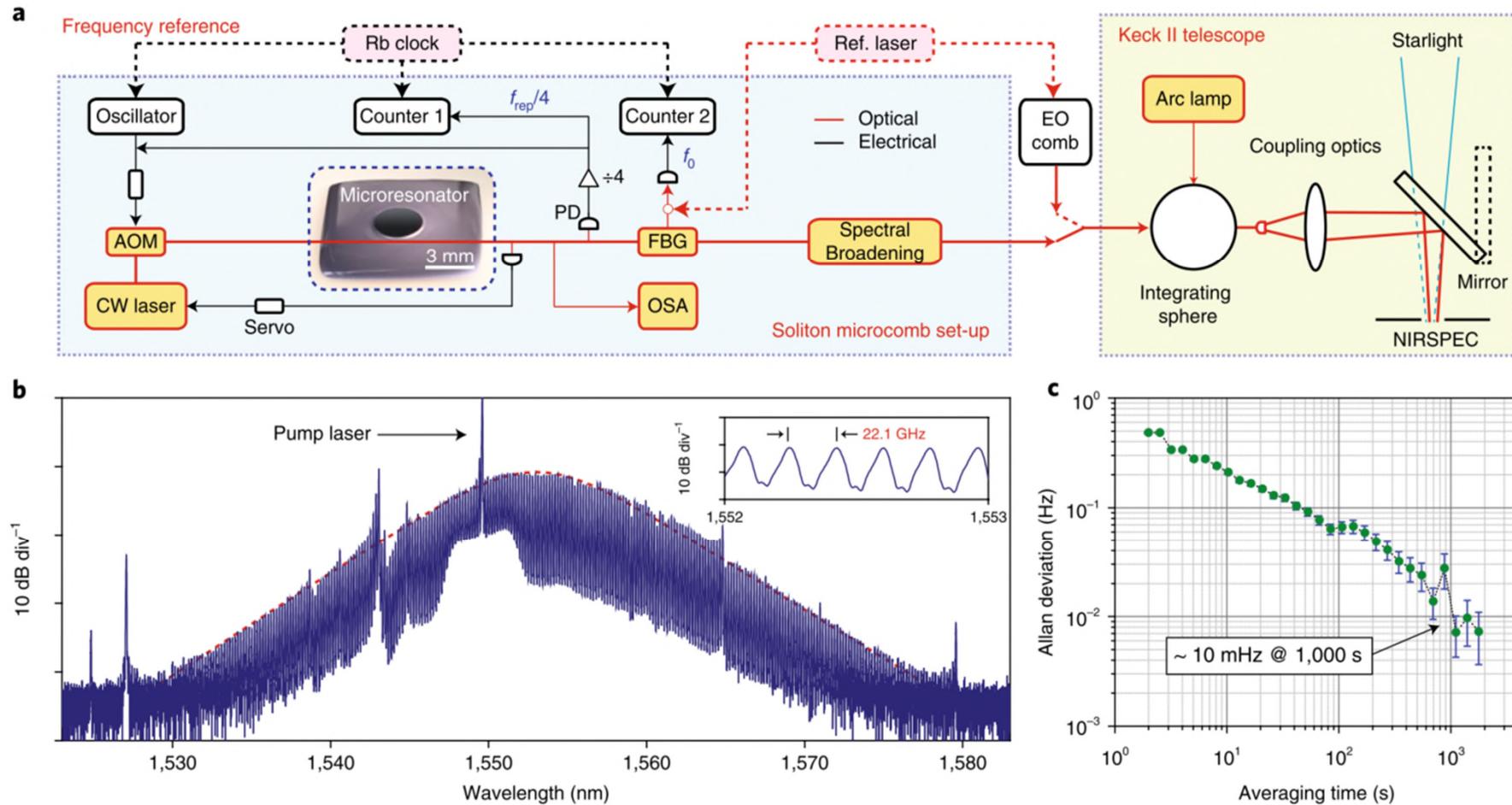
励起レーザーの波長の掃引方法を探索し、モード同期レーザーのように周期的にパルスが出力される動作条件を発見

その後、チップ化の進展

T. Herr *et al.*, Nature Photon. **8**, 145 (2013).



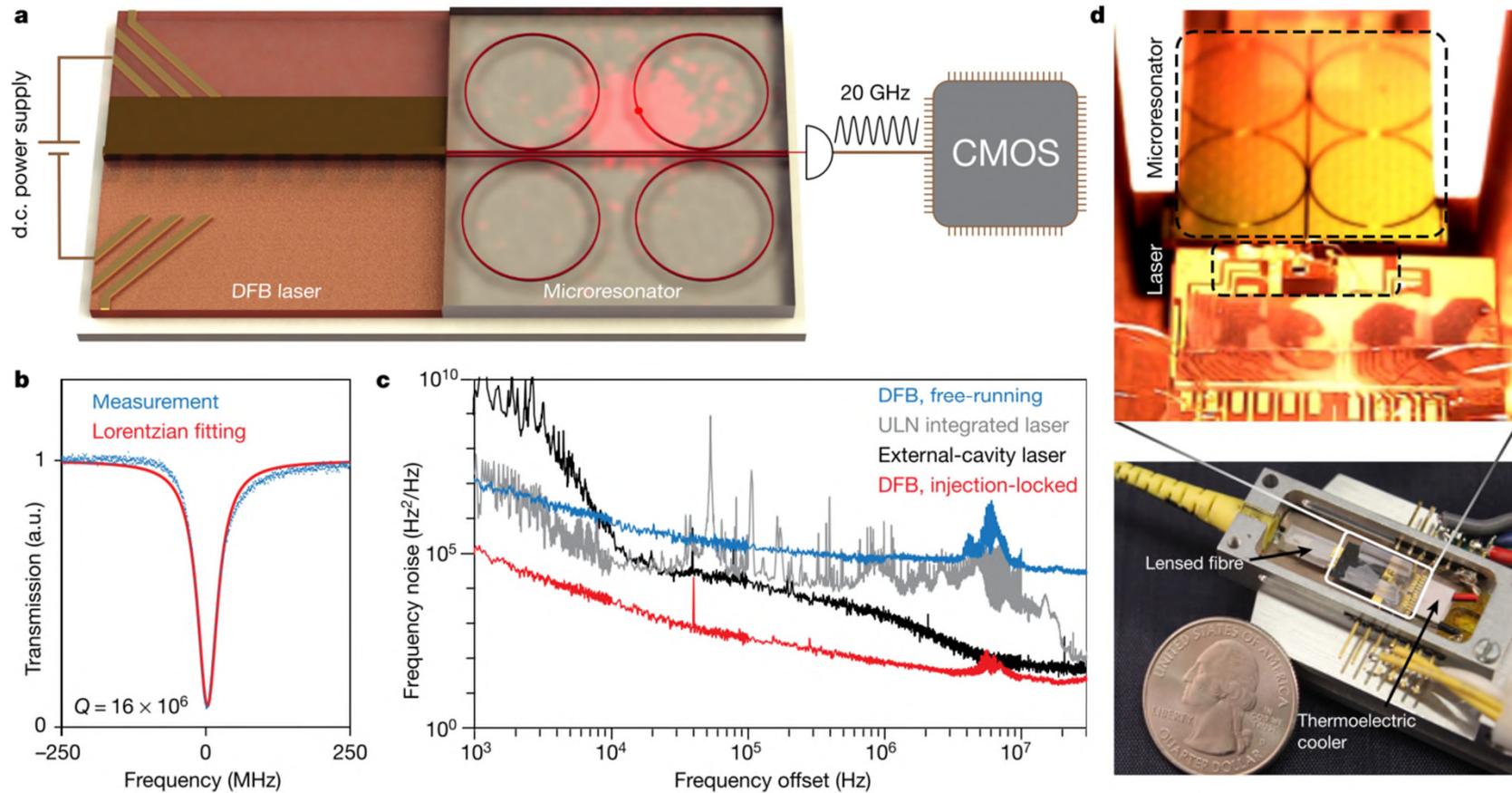
# マイクロコムを用いた天文コム(2019)



励起レーザーの波長が全体のオフセット周波数を、  
パワーがコムの間隔を調整出来る

M. G. Suh *et al.*, Nature Photon. **13**, 25 (2019).

# 励起レーザーを含む集積化の進展(2020-)



B. Shen *et al.*, Nature **582**, 365 (2020).

通信波長帯であれば、間もなく商用ベースになるとみられるマイクロコムはランプのように使える校正光源になるかも知れない。  
(RF測定器や光周波数の計測、制御は必要)

# まとめ

## フェムト秒光周波数コム of 概要

### 1.6 GHz Ti:sapphireコムを用いた緑領域天文コム of 構築と試験運転

E. Chae *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **38**, A1 (2021).

- 基本コム of 繰り返し周波数が高く、フィルタ共振器 of 条件が緩和
- 43 GHz繰り返し of 天文コムを在庫ミラーで構築
- 535-550 nmでSide-mode rejection  $<5 \times 10^{-4}$
- HIDESにて試験運転
  - 536-554 nmの領域でRV 1.4 m/sの精度
  - 84分間の分散はRV 8 m/s精度相当
- 200 nmの帯域にはミラーの分散制御が主要な課題

### 1.6 GHz Ti:sapphireコムを用いたYバンド天文コム of 構築

- 試作フィルタ共振器(特注)で構築
  - 約20 nmにわたりSide-mode rejection  $<1 \times 10^{-4}$
  - Yバンド全域ではSide-mode rejection  $<1 \times 10^{-2}$ と不十分
- 別途製作中のミラーによって、Yバンドほぼ全域で $<1 \times 10^{-4}$ が実現見込

## EOコム、マイクロコム of 発展

- フィルタ共振器不要。1.1  $\mu\text{m}$ より長波 of 近赤外域では必要十分 of 可能性
- 光周波数 of 純度、長期再現性は今後 of 研究が必要