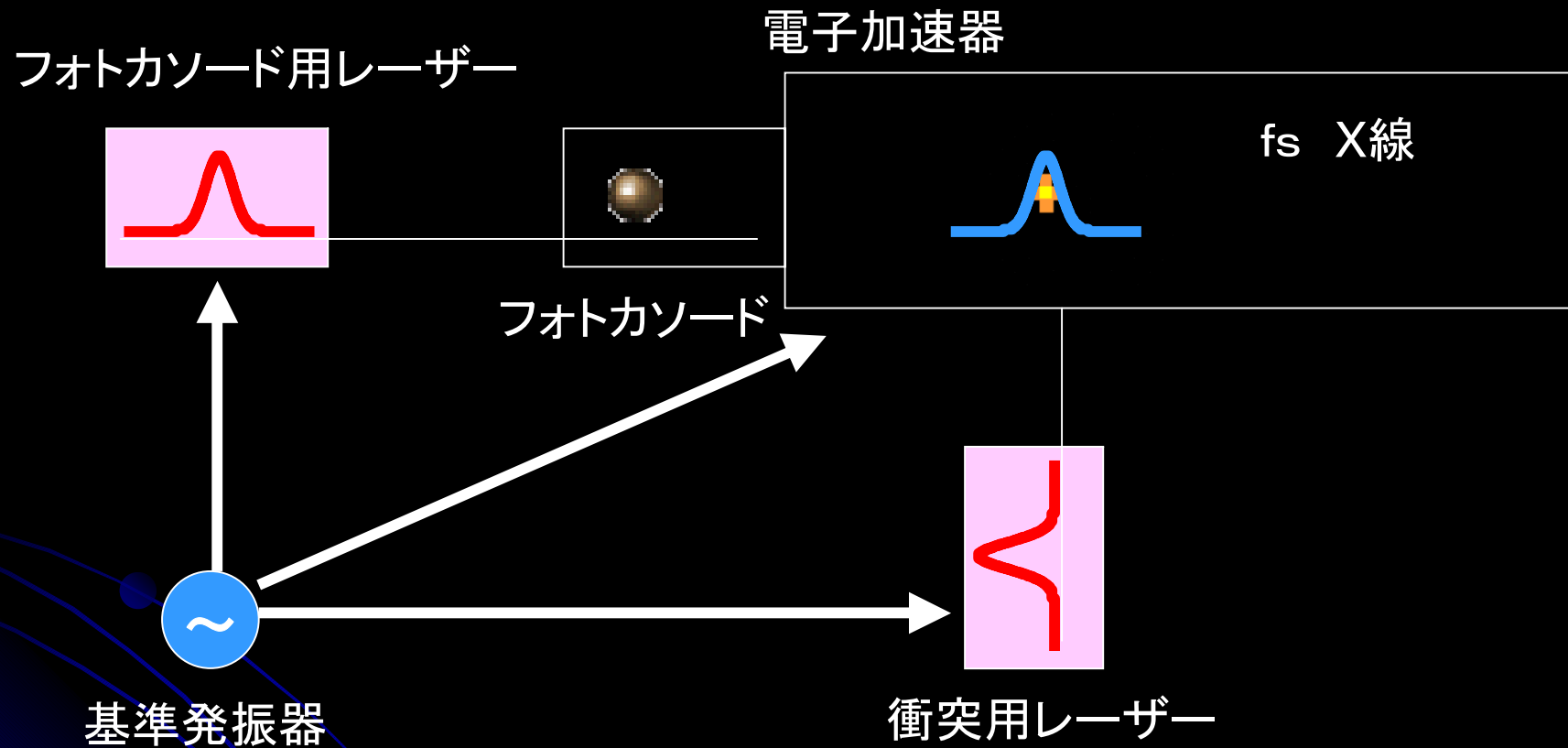


レーザーコンプトン散乱装置用 タイミング同期レーザー

産業技術総合研究所

小林洋平 吉富大 鳥塚健二

レーザーコンプトン散乱



- 全てのタイミング同期を取る必要がある
- タイミングデリバリ

必要なレーザー技術

● フォトカソード用レーザー

- 波長 カソード材料による (ERLでは $\sim 800\text{nm}$)
- 平均パワー 繰り返しによる (ERLでは $>30\text{ W}$)
- 繰り返し (ERLでは 1.3GHz)
- パルス幅 フェムト秒

● 衝突用レーザー

- Ti:sapphireレーザーのCPAシステム

● タイミング同期

- フェムト秒精度での異なるレーザーのタイミング同期

● タイミングデリバリ

- $\sim \text{km}$, $\sim 20\text{ fs}$

アウトライン

- **コンプトン用タイミング同期実験**

- 2.856 GHz レーザーと119 MHz レーザーとの**5fs** タイミング同期

- **異なる波長の超高精度タイミング同期実験**

- Ti:sapphireレーザーとCr:forsteriteレーザーとの**アト秒**タイミング同期
- Cr:forsteriteレーザーとEr:fiberレーザーとの**3fs**タイミング同期

- **Ybファイバー増幅実験**

- 100-MHz、フェムト秒パルス列の7W増幅

- **エンハンスメント共振器の可能性**

- コンプトン散乱実験の秘密兵器になるか？

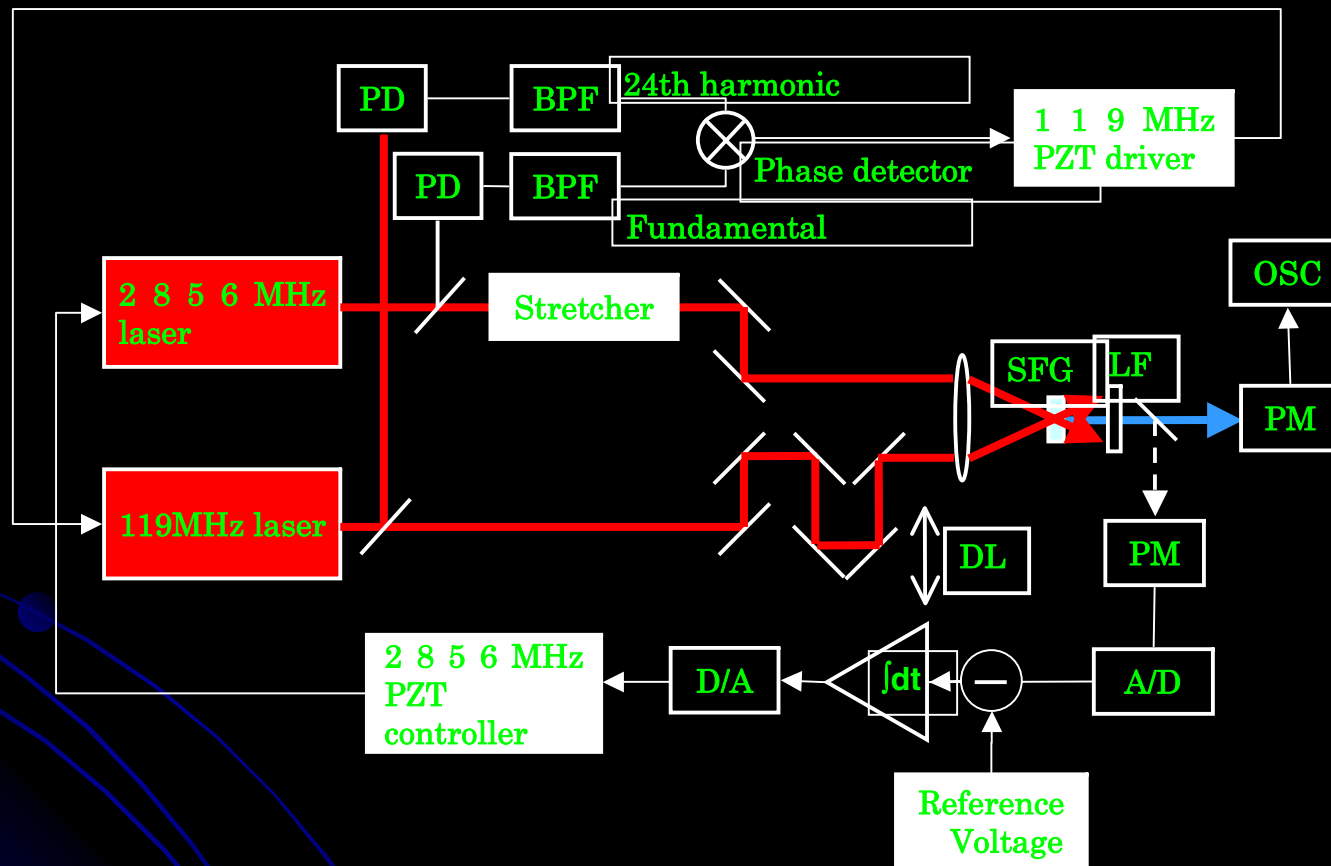
タイミング同期

- フォトカソード用レーザーと応用実験用レーザーとのタイミング同期
 - 要望は何fs？
- 異なる繰り返し周波数のレーザー間の同期
- 遠方のレーザー間の同期

これらを解決する必要がある。

以前FESTAと共同で行ったまさに、この用途のタイミング同期実験を紹介する

2.856 GHz、119MHz レーザーのタイミング同期



PD: photodiode, BPF : Bandpass filter, SFG: sum-frequency generation,
LF: 400nm line filter, PM: photomultiplier, OSC: oscilloscope, DL: delay line.

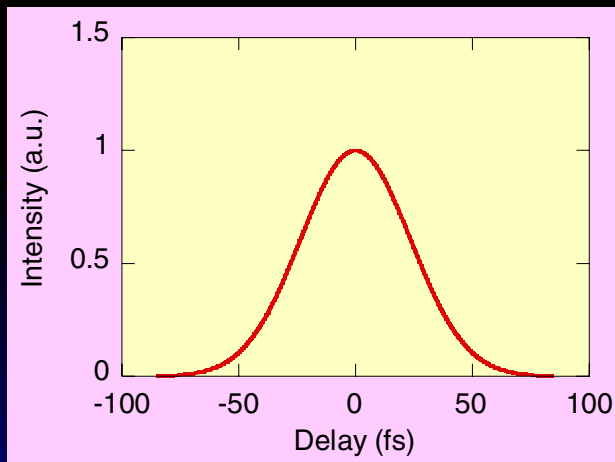
電気のPLL制御だけの場合

相関光を用いた時間ジッター計測結果

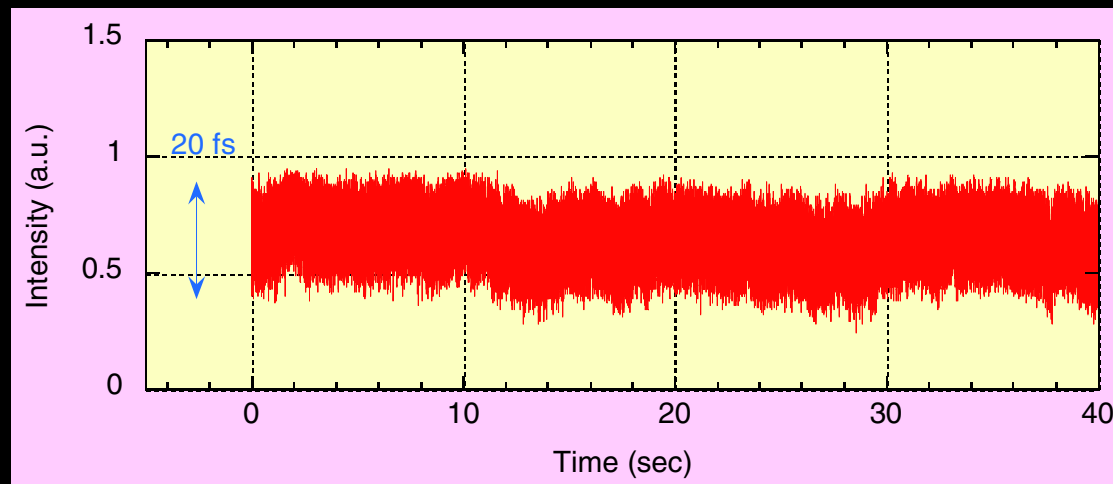
フォトダイオードによる光検出

測定帯域 最大300 kHz

測定帯域	時間ジッター
300 kHz - 2.5 Hz	5.7 fs
30 kHz - 0.25 Hz	6.3 fs
3 kHz - 25 mHz	4.9 fs

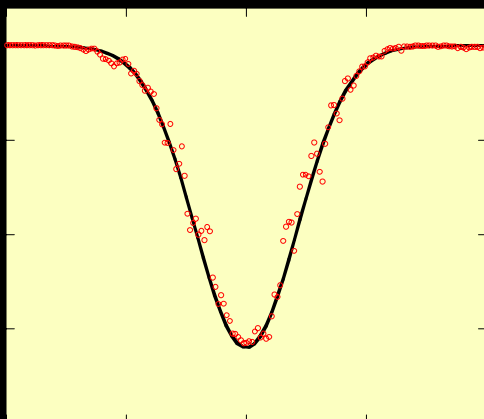


相互相関光のプロファイル

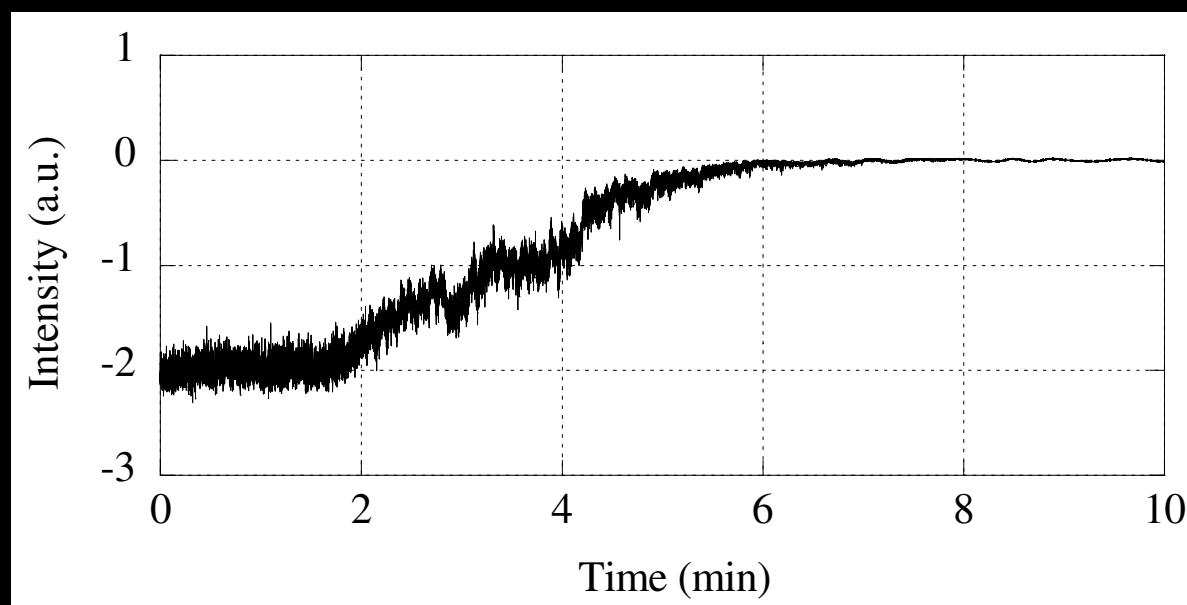


帯域 3 kHzでの測定結果

発生したドリフトのようす



掃引相互相関波形



ドリフトの観測 5 – 15 min / 100 fs

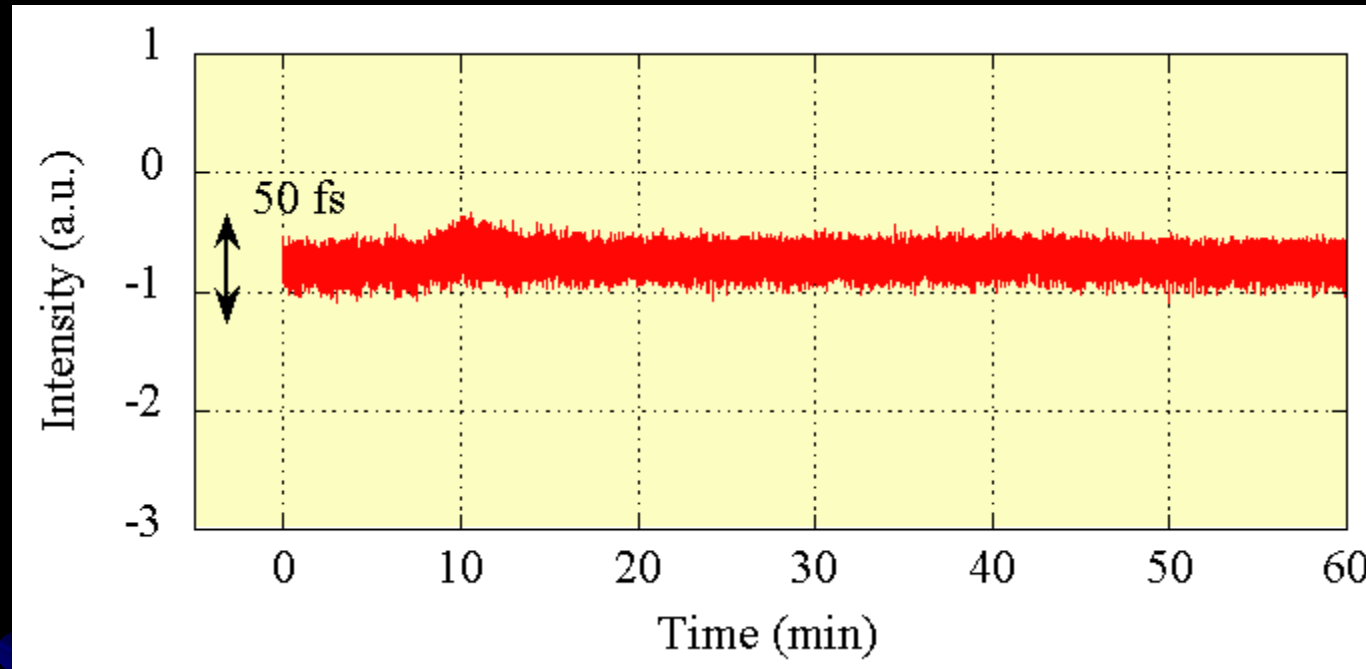
原因として考えられるもの

- ・温度変化による光学定盤やRFケーブルの伸縮
- ・位相比較器の基準参照電圧の変動

1度で 10^{-5} : 1kmなら10mm=30 ps. 10fsに抑えるためには0.3mK以内！

タイミングデリバリの難しいポイント

長時間同期(+相関光フィードバック)



RMS jitter < 4 fs (50 Hzサンプリング)

同期精度を維持したまま、1時間以上の運転が可能になった

2台のチタンサファイアレーザーはタイミング同期できる
長距離の問題は依然残る

Control of Ti:sapphire and Cr:forsterite laser

NIST, coherent synthesis ($< \text{ms}$)

A. Bartels, et. al. Opt. Lett. 29, 403 (2004)

MIT 0.3-fs timing jitter, phase relation observation

T. Schibli et. al. Opt. Lett. 28, 947 (2003)

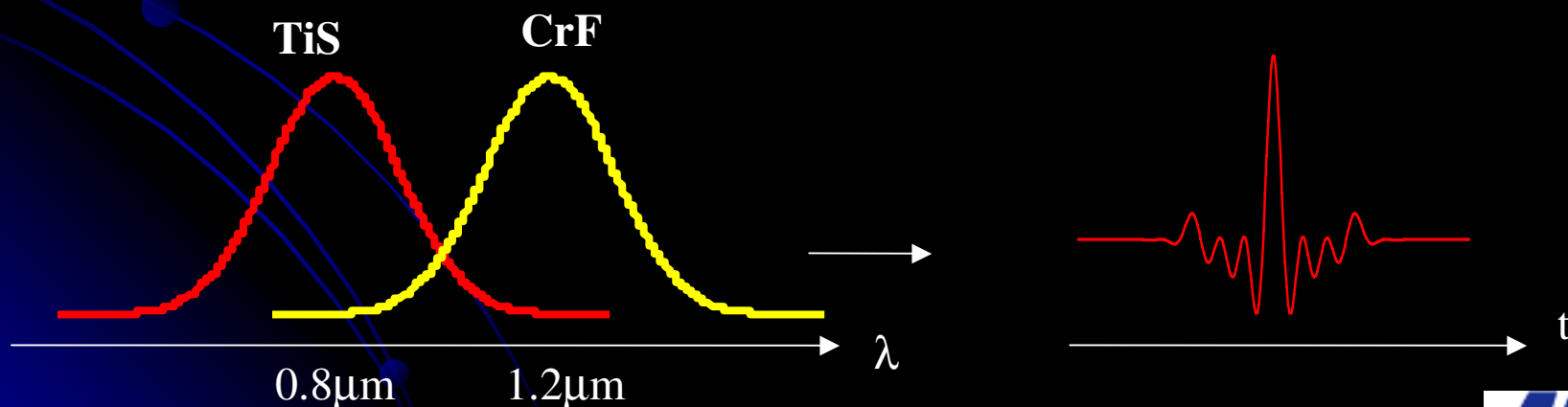
AIST 1-fs timing jitter (2002), phase control (2003)

0.1-fs timing jitter

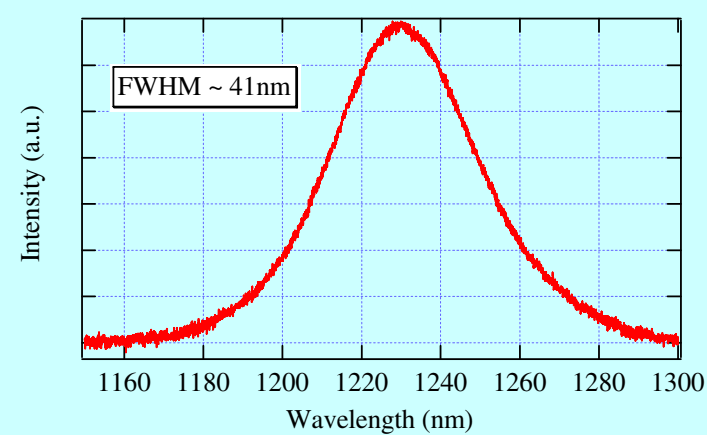
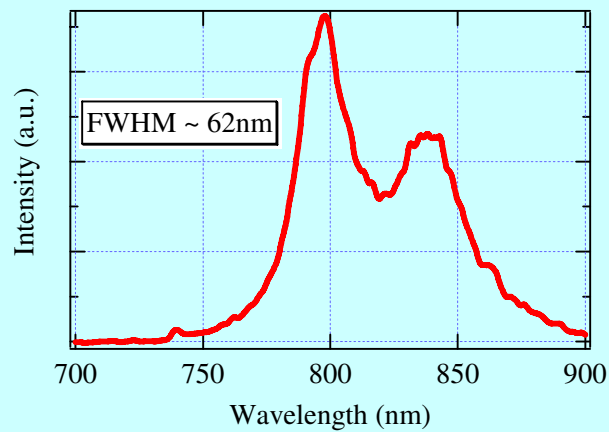
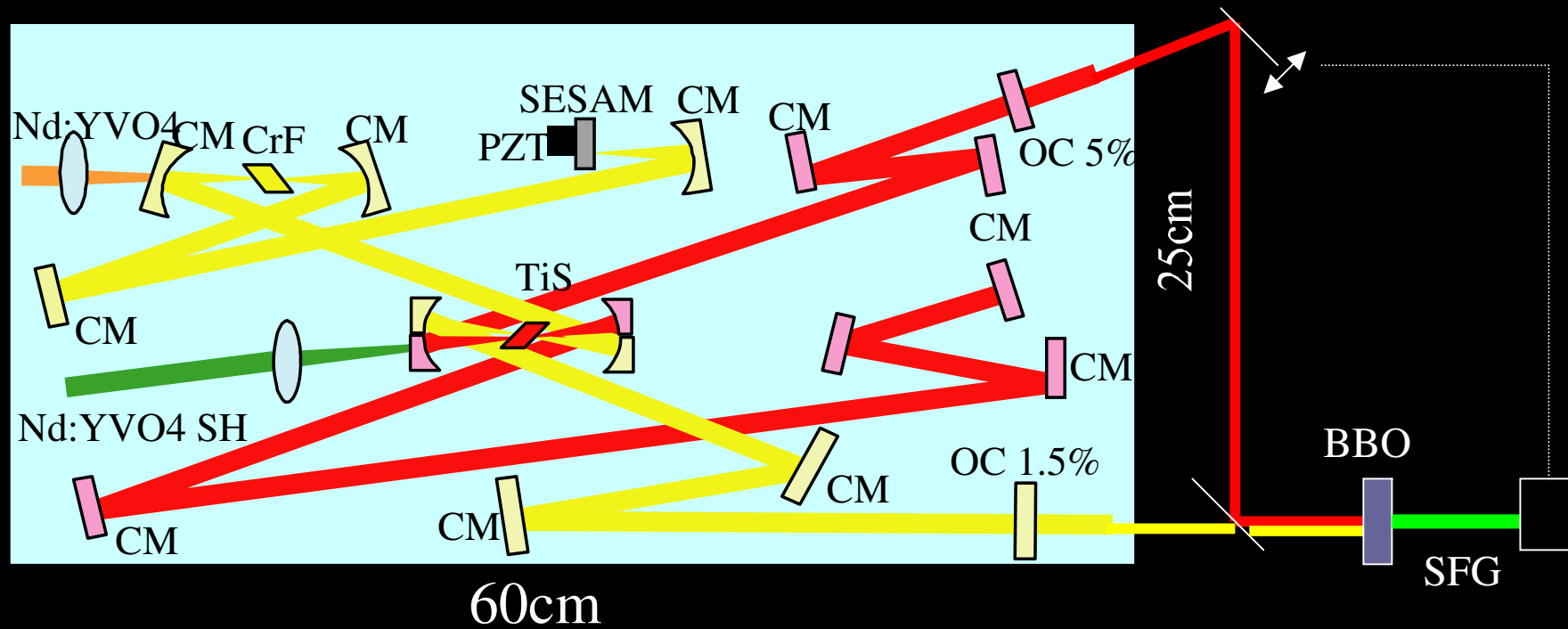
D. Yoshitomi et. al. Opt. Lett. 30, 1408 (2005)

Tight optical phase locking ($>3000 \text{ s}$)

Y. Kobayashi et. al. Opt. Lett. 30, 2496 (2005)



Passively synchronized two-wavelength laser



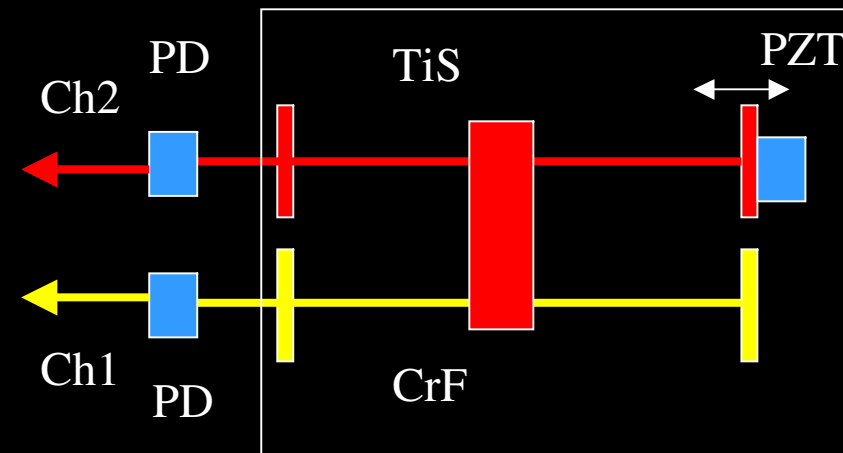
Movie of passive synchronization

Changing the cavity length by PZT,

Two-wavelength laser



Oscilloscope



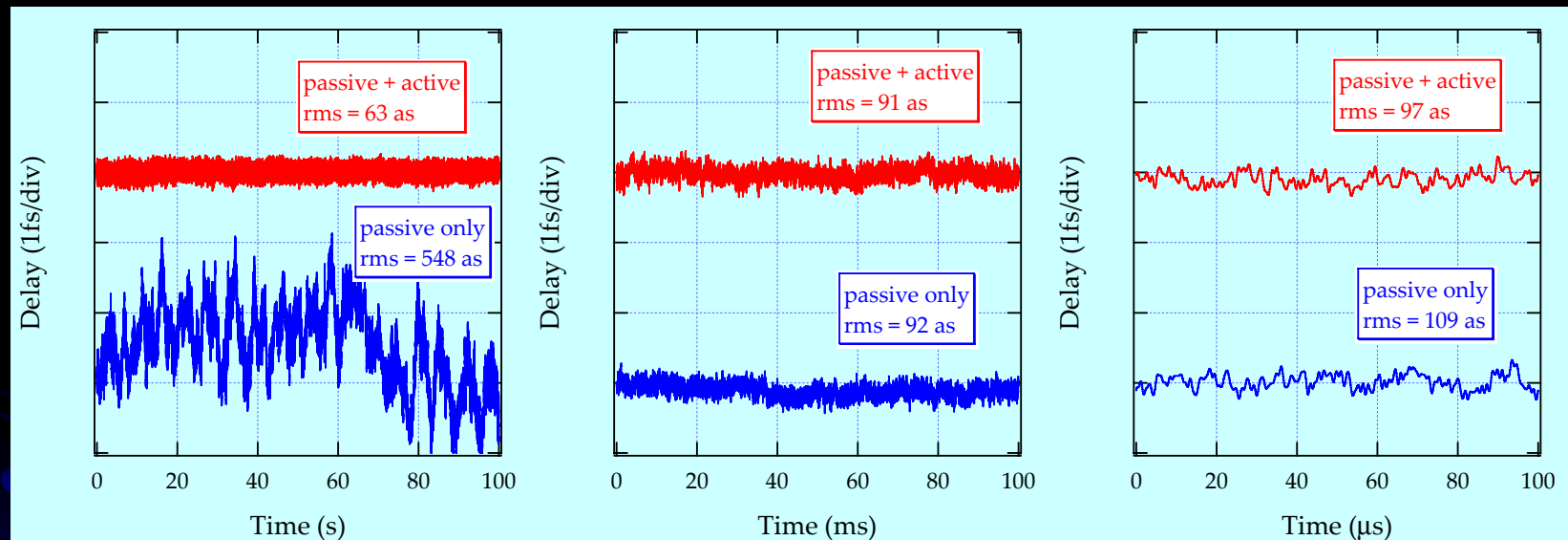
How about the timing jitter?

Timing jitter in various observation bandwidths

1kHz BW

100kHz BW

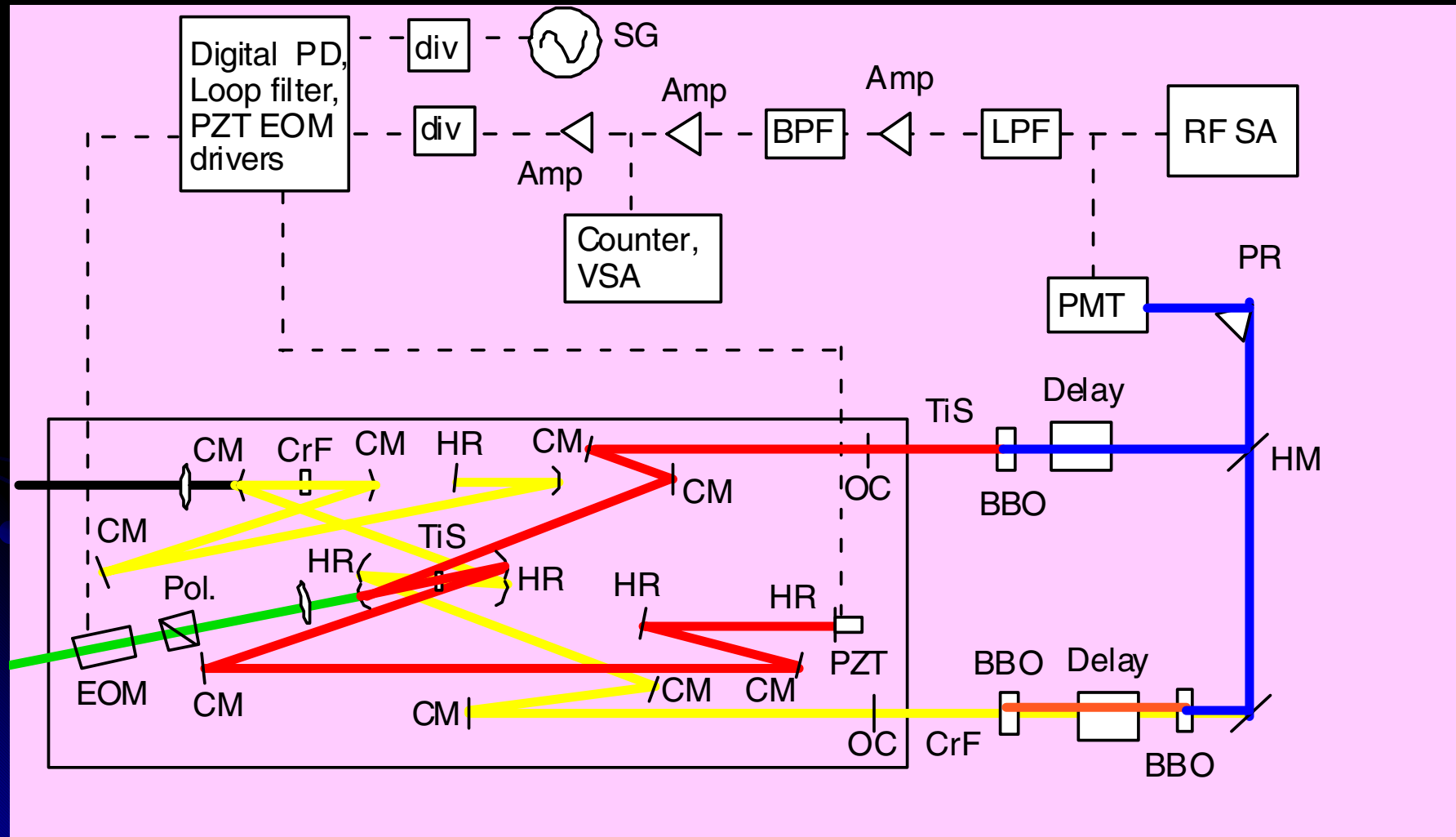
1MHz BW



Slow jitter (1kHz BW) was significantly reduced by active control!

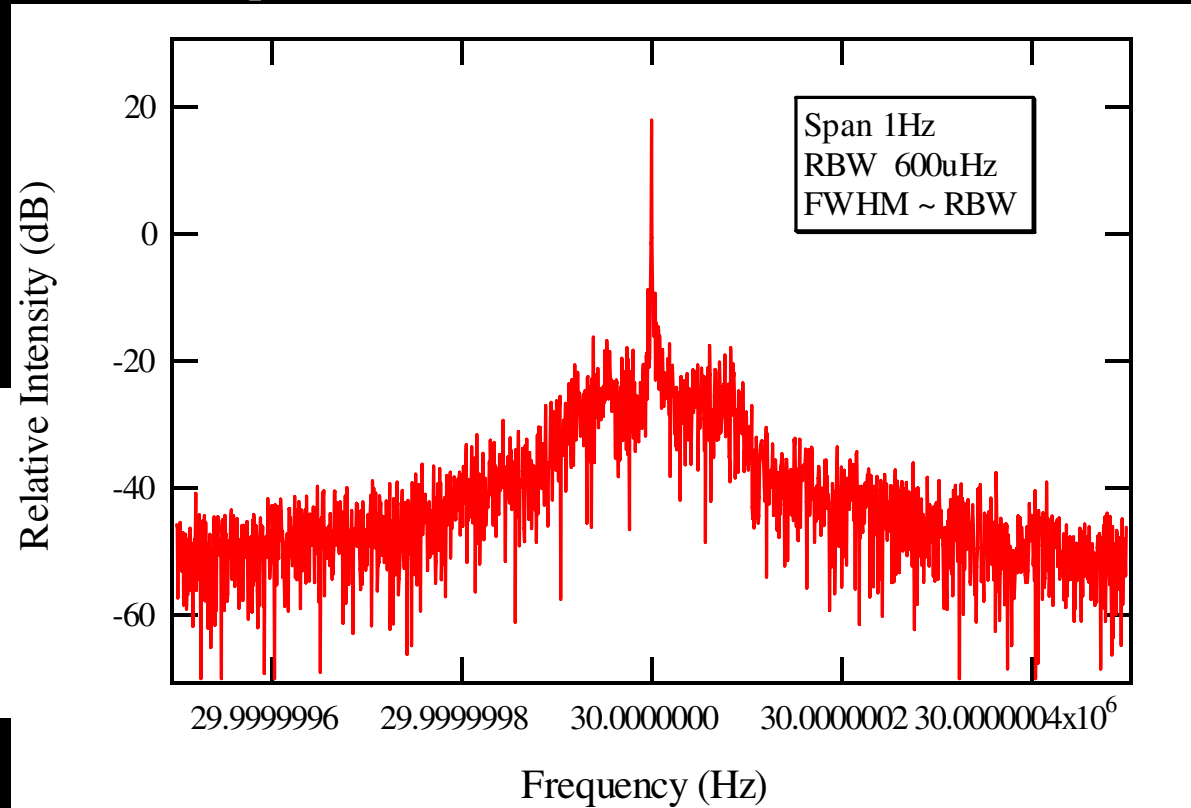
98 ± 18 as (10mHz – 100kHz)
 126 ± 20 as (10mHz – 1MHz)

光位相同期もできる

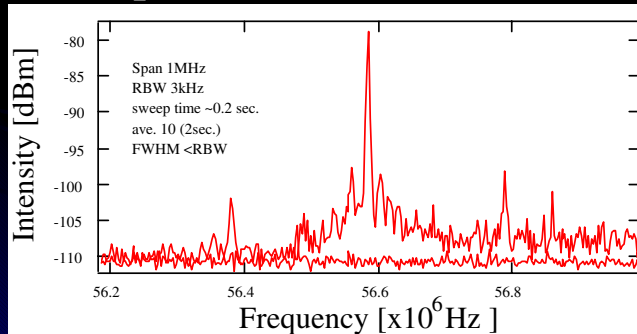


Optical phase control – RF spectrum of locked beat

This work (2005)
Span 1 Hz



Previous work in 2003
Span 1 MHz



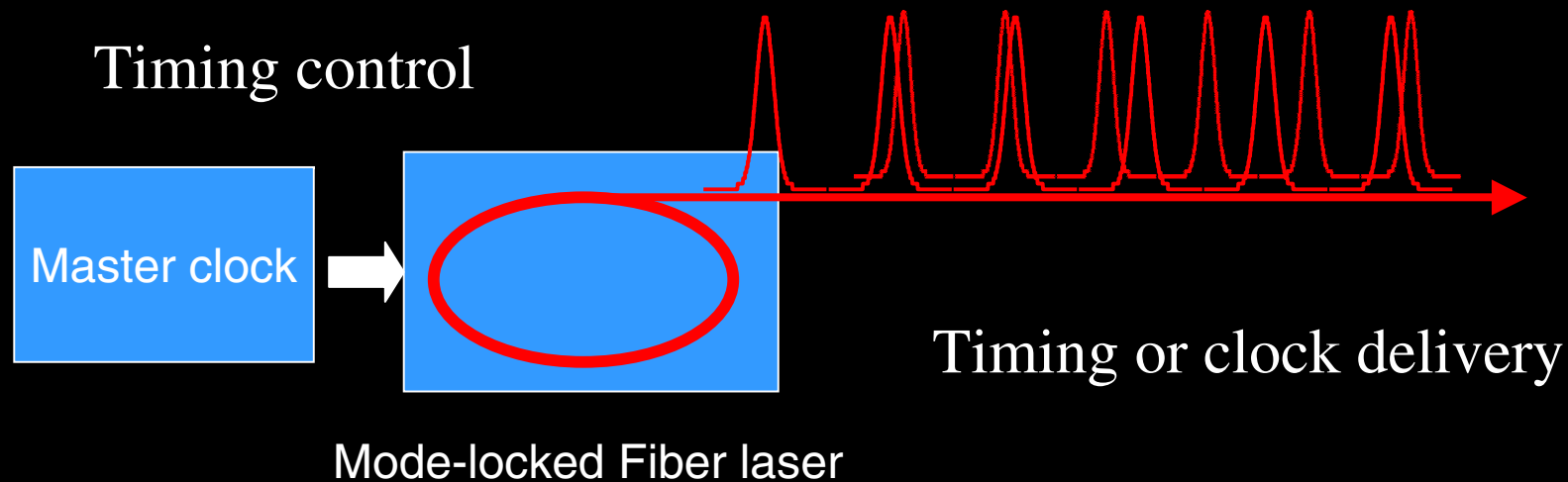
3-kHz line width

600- μ Hz line width is limited by RBW

Y. Kobayashi et. al. Opt. Lett. 30, 2496 (2005)



ファイバーレーザーのタイミング同期



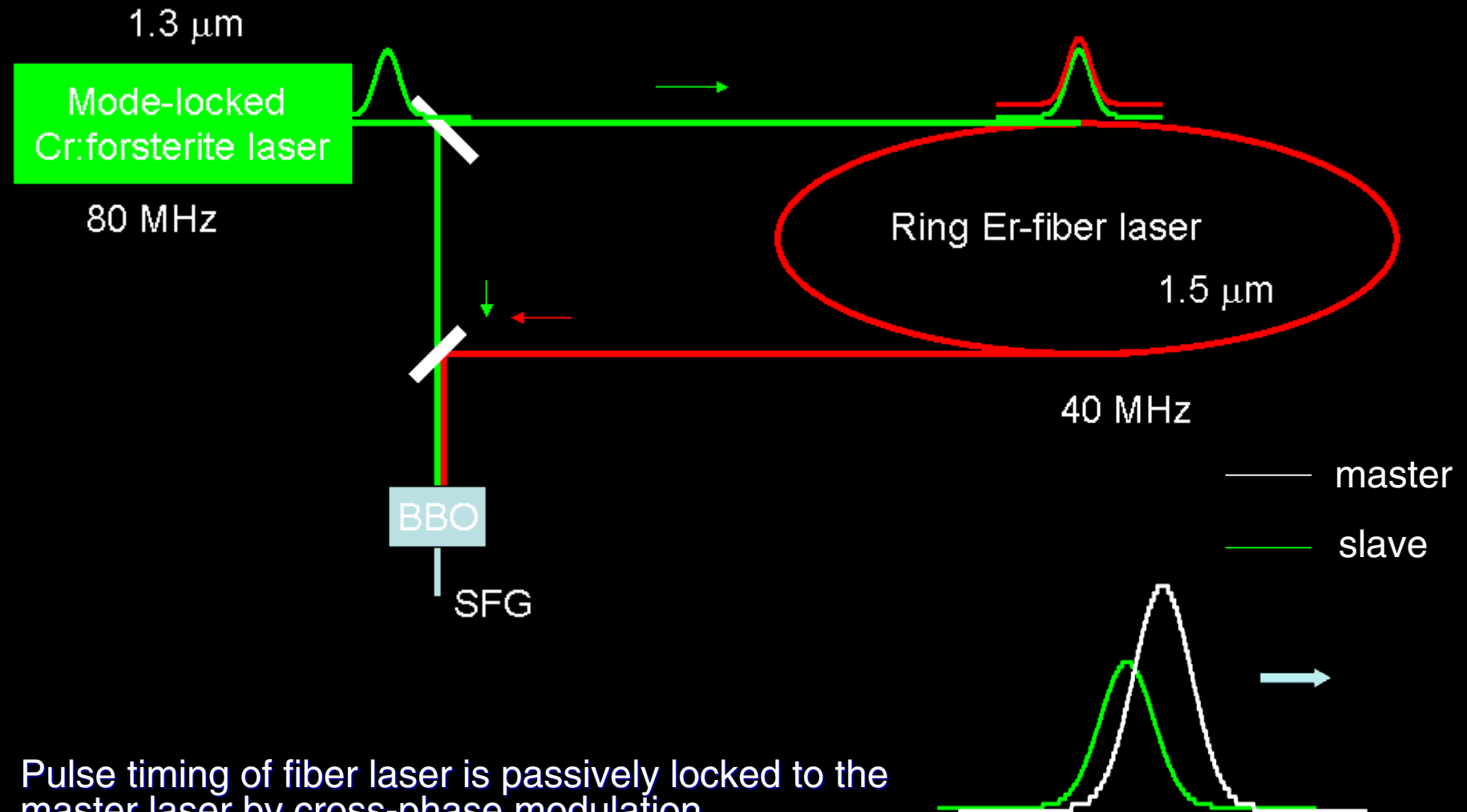
Precise timing control of the fiber laser is required for clock delivery in a short range application (10-km region).

10-fs timing jitter with active control was demonstrated [*]

- How precise can we control the timing jitter?

[*] D. D. Hudson, et. al., Opt. Lett. 31, 1951 (2006).

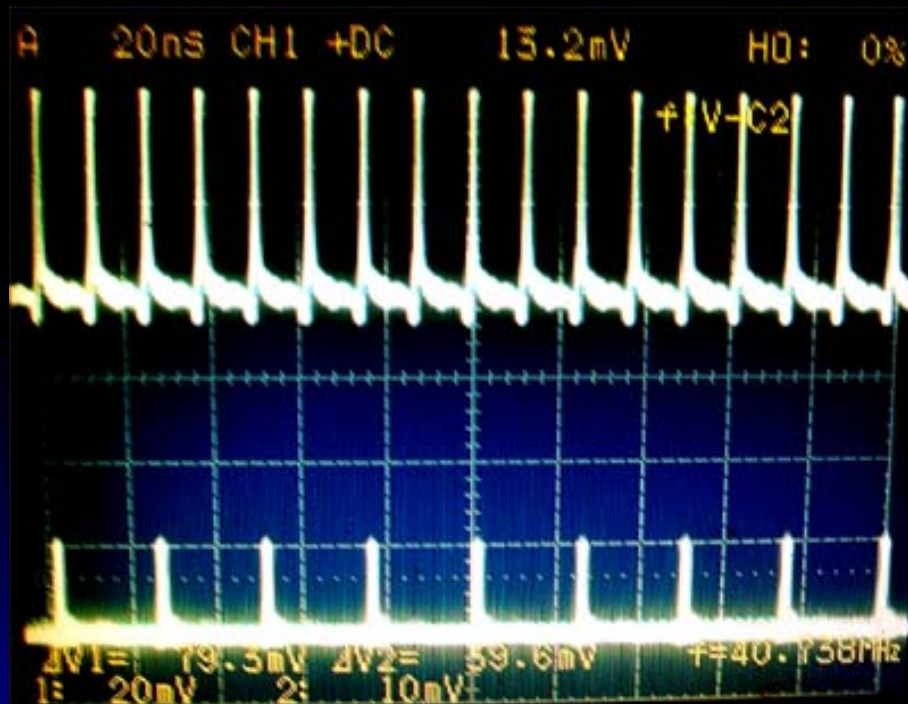
我々独自の技術 — 受動タイミング同期



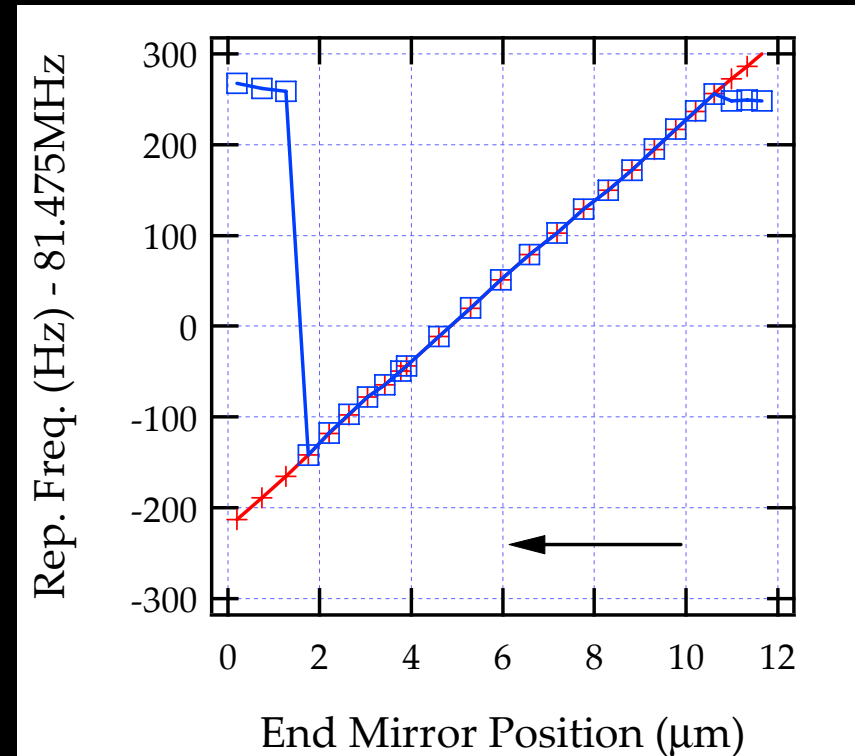
- Pulse timing of fiber laser is passively locked to the master laser by cross-phase modulation.
- Intensity fluctuation of the sum frequency corresponds to the timing fluctuation.

Results -Timing synchronization

Picture of master (upper) and slave (lower) pulses

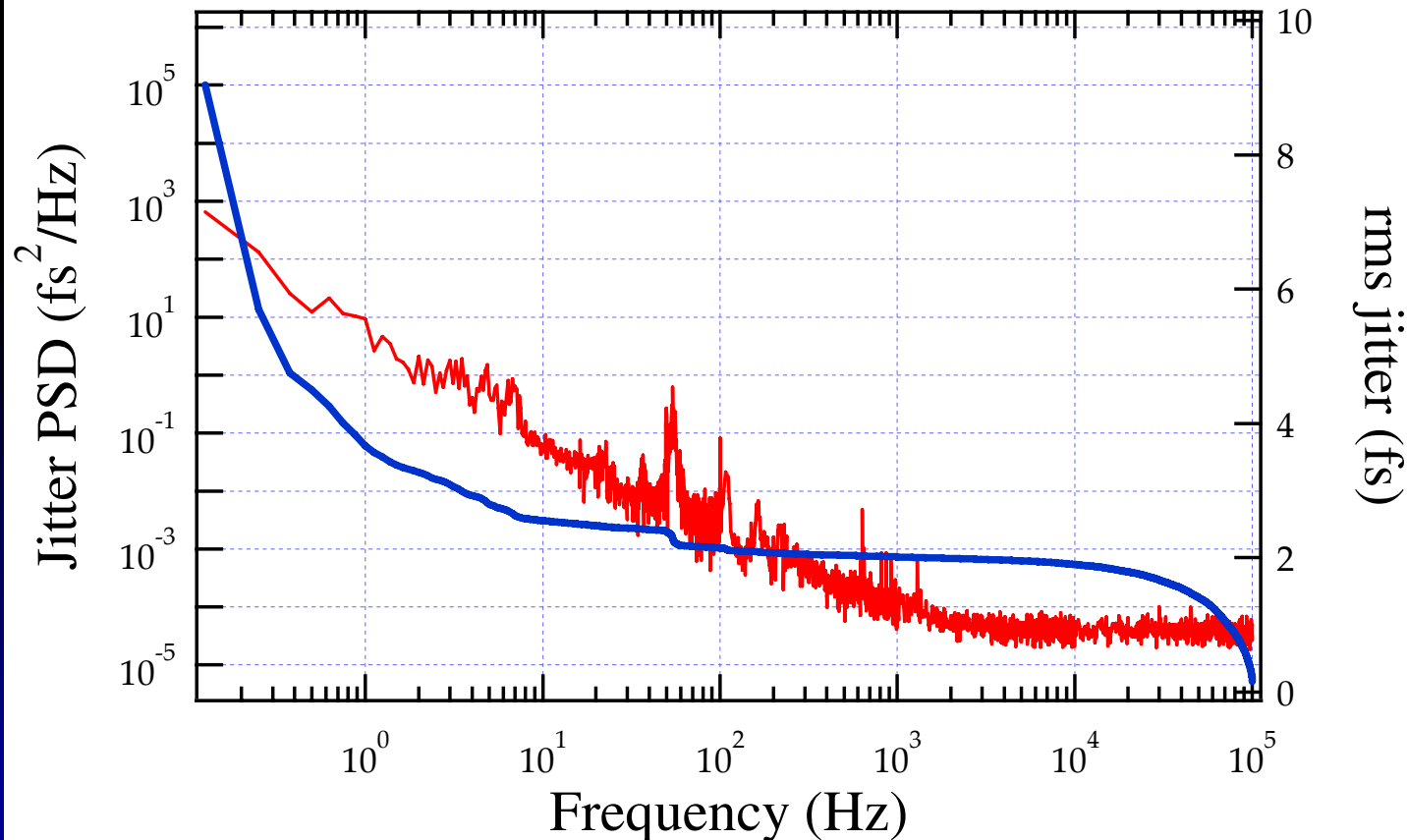
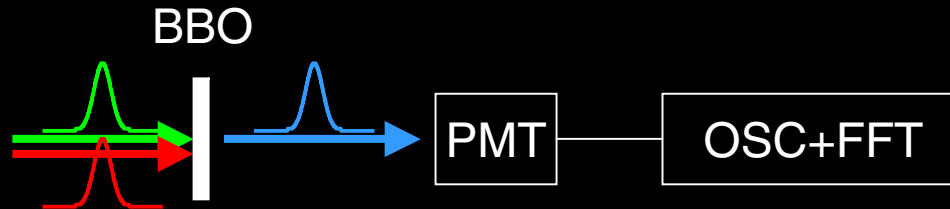


Tolerance of cavity mismatch



- Repetition rate of fiber laser is synchronized to that of master laser.
- Tolerance is ~ 400 Hz.

Result - Timing jitter

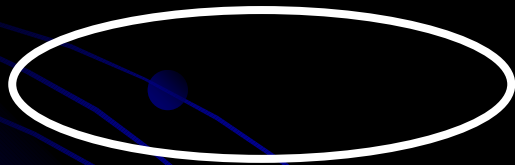


2 fs @ 100 Hz-
100 kHz
3.7 fs @ 1 Hz –
100 kHz

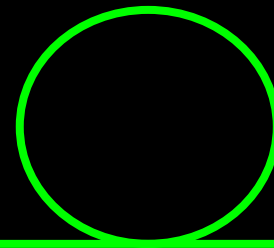
D. Yoshitomi et. al.
Opt. Lett.

Ybファイバー発振器及び増幅器 — フォトカソード用レーザー

Yb:ファイバーレー
ザー発振器



YDF



Pump LD

>10 W

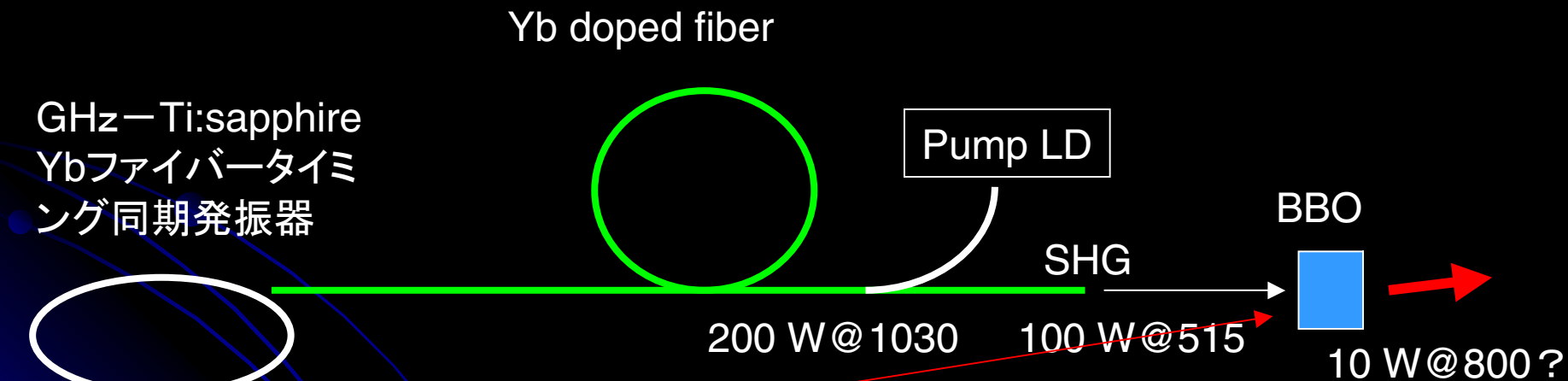
SHG

10 W@500

スケーラビリティ : 現状では100W、
それ以上はLDとファイバーの開発が必要

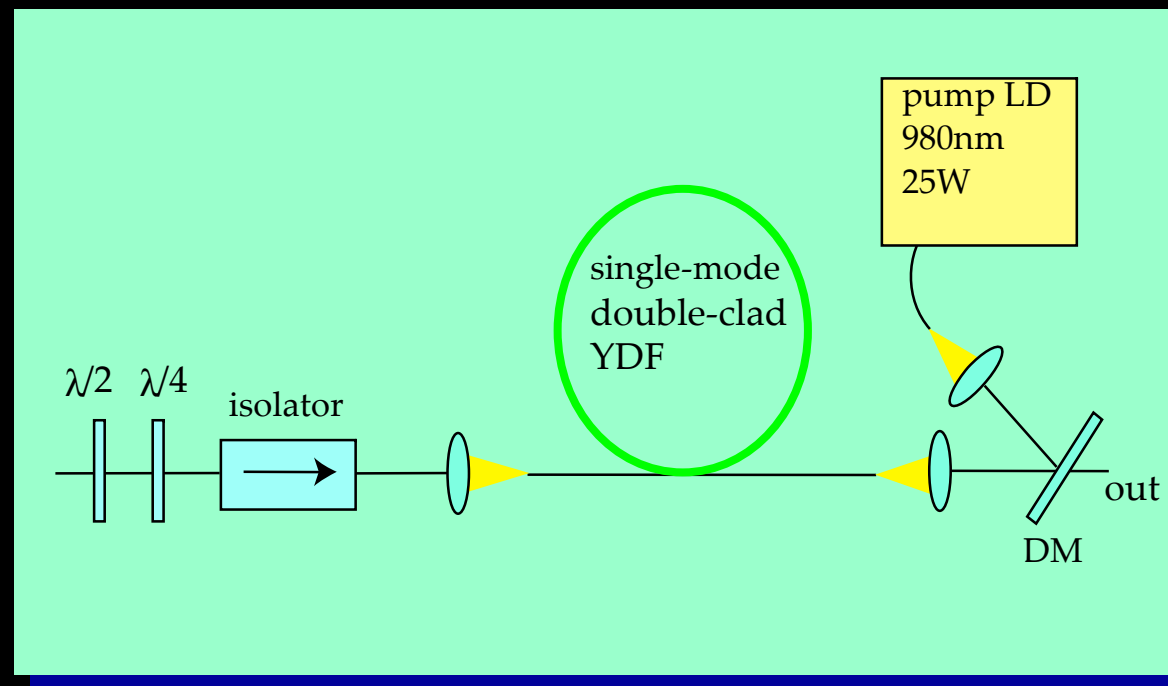
700-900nm のためにはOPA

- 発振器 Ybファイバーレーザー
- 増幅器 Ybファイバー
- OPA BBO



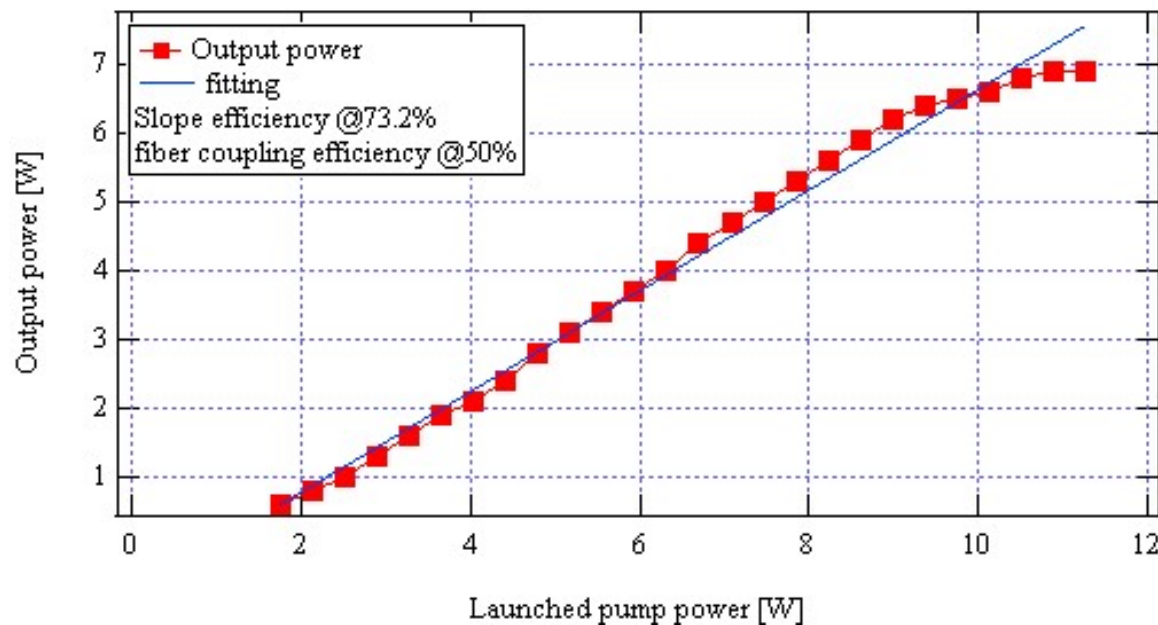
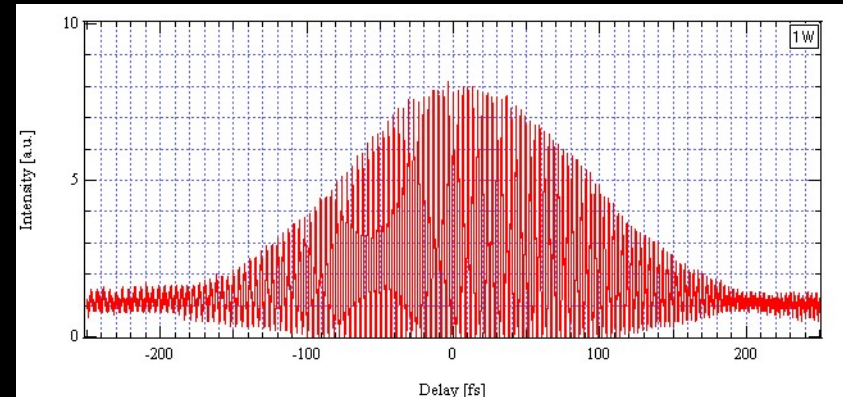
Ybファイバー増幅器

100MHz Ybガラス
レーザー発振器



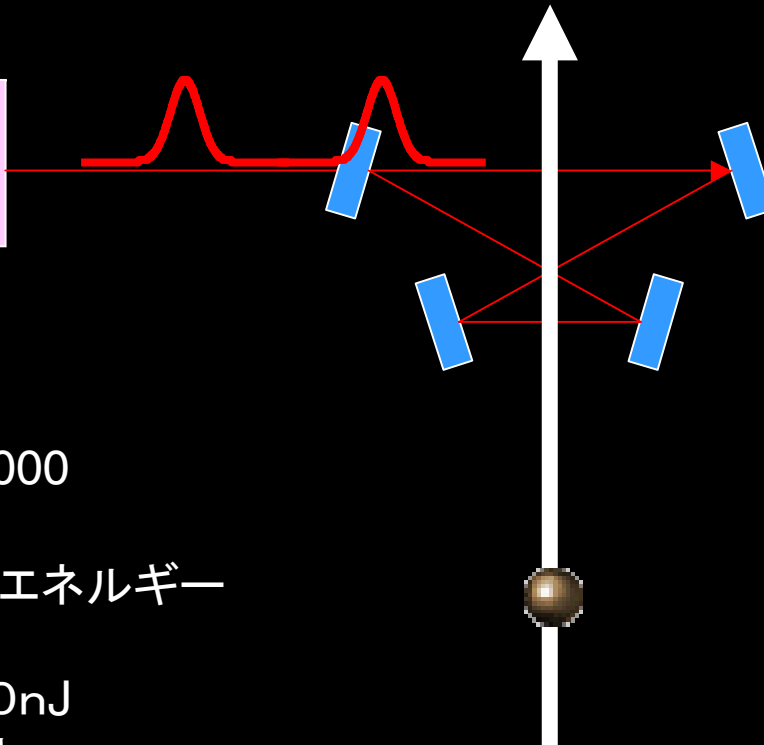
Ybファイバー増幅器

チタンサファイアレーザーシード
100MHz繰り返しYbファイバアンプ
平均出力 7 W
パルスエネルギー 70 nJ
パルス幅(圧縮後) 114 fs



エンハンスメントキャビティ

GHz発振器 + 増幅器



キャビティ-Q=1000
なら、
1000倍のパルスエネルギー

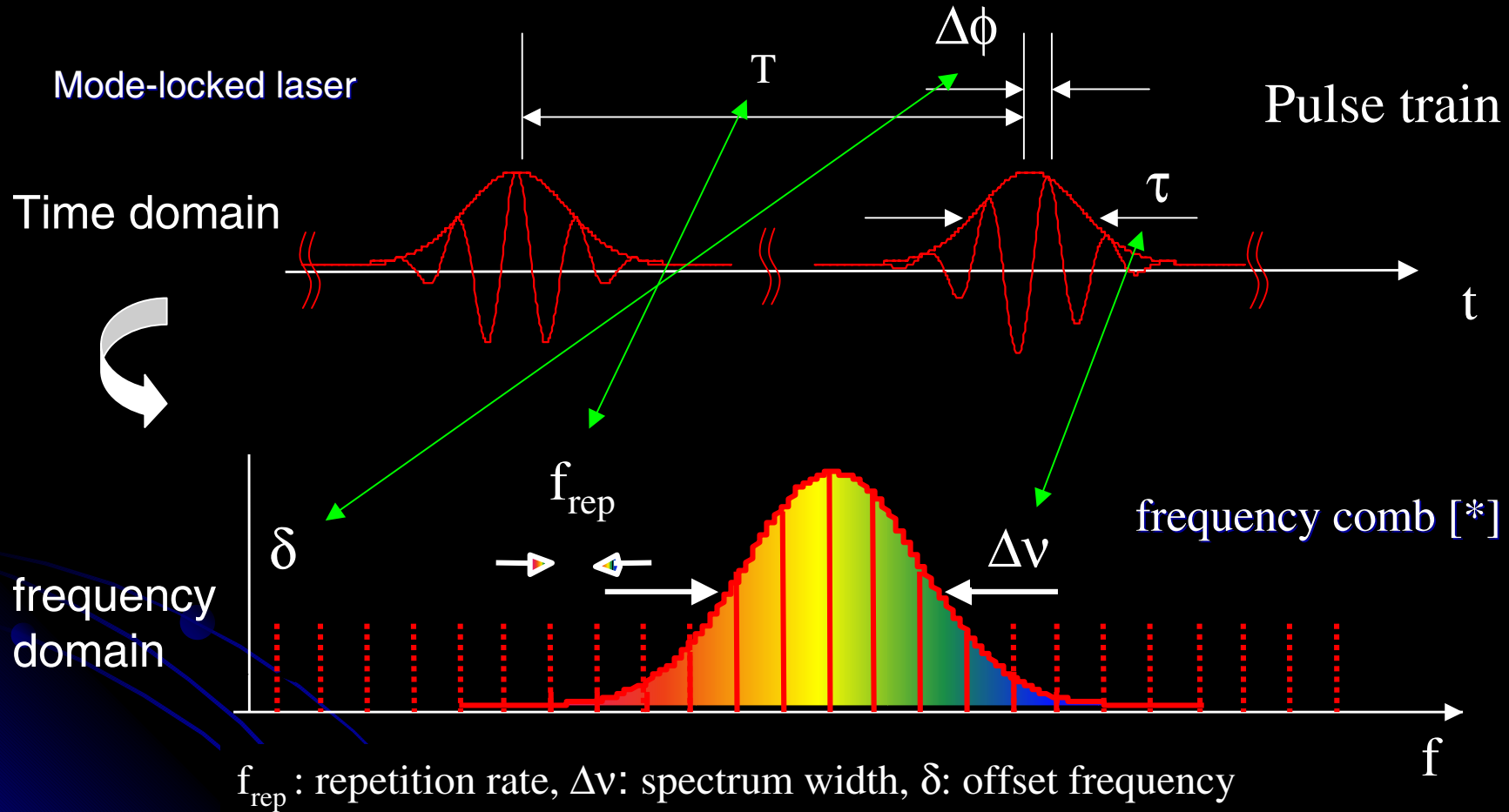
GHz、10Wなら10nJ
キャビティ内では
10 μ J

電子バンチ

例えばT. Schibli et. al., CLEO2007 postdeadline paper



Femtosecond frequency comb



Comparable to hundred-thousand narrow cw lasers!

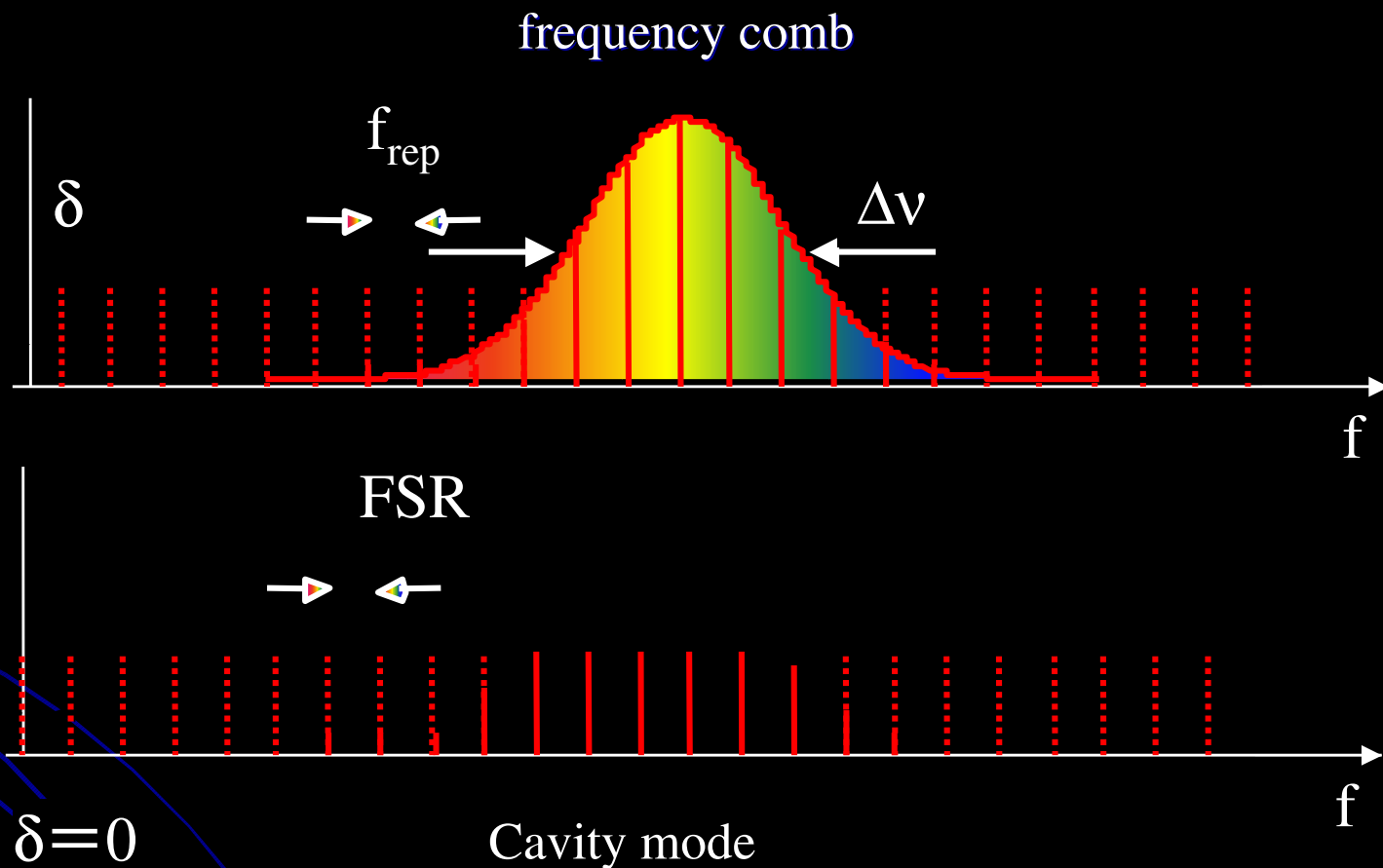
Frequency ruler, precision measurement- Frequency, timing, clock deliveries.

[*]

D. J. Jones, et al., Science, 288, (2000) 635

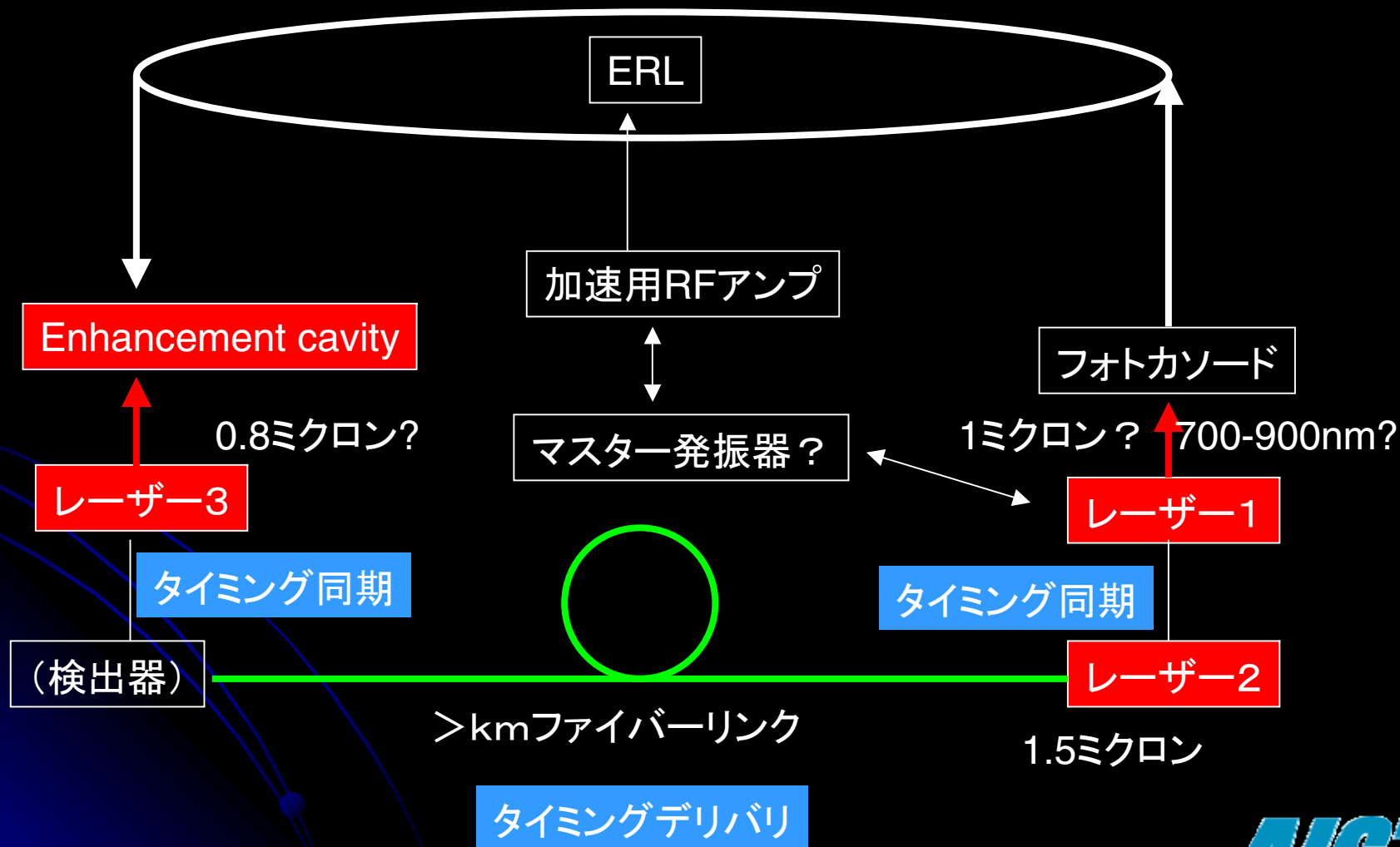


Cavity mode and frequency comb



オフセット周波数と繰り返し周波数の2自由度をロックする必要がある。

加速器のシステムに必要なと思われるレーザー



現状と課題

- タイミング同期 fsレベル
- GHz-Yb発振器
- 高出力Ybファイバーアンプ
- タイミングデリバリー