

# ねじれ振り子型重力波望遠鏡

## TOBAの開発(35):

### 低温モノリシック光学系の開発

---

高野 哲, Ooi Ching Pin, 大島 由佳, 道村 唯太<sup>A, B</sup>, 安東 正樹

東大理, カリフォルニア工科大学<sup>A</sup>, 東大ビッグバン<sup>B</sup>



# 概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡TOBAの開発を行い, 0.1 Hz帯の重力波の検出を目指している
- Phase-IIIと呼ばれるプロトタイプに向けて, 低温ねじれ振り子を開発中
- 高感度化に向けたモノリシック読み取り光学系の開発
- 低温下でのモノリシック光学系に向けた特性評価
  - 差動Fabry-Perot干渉計の評価

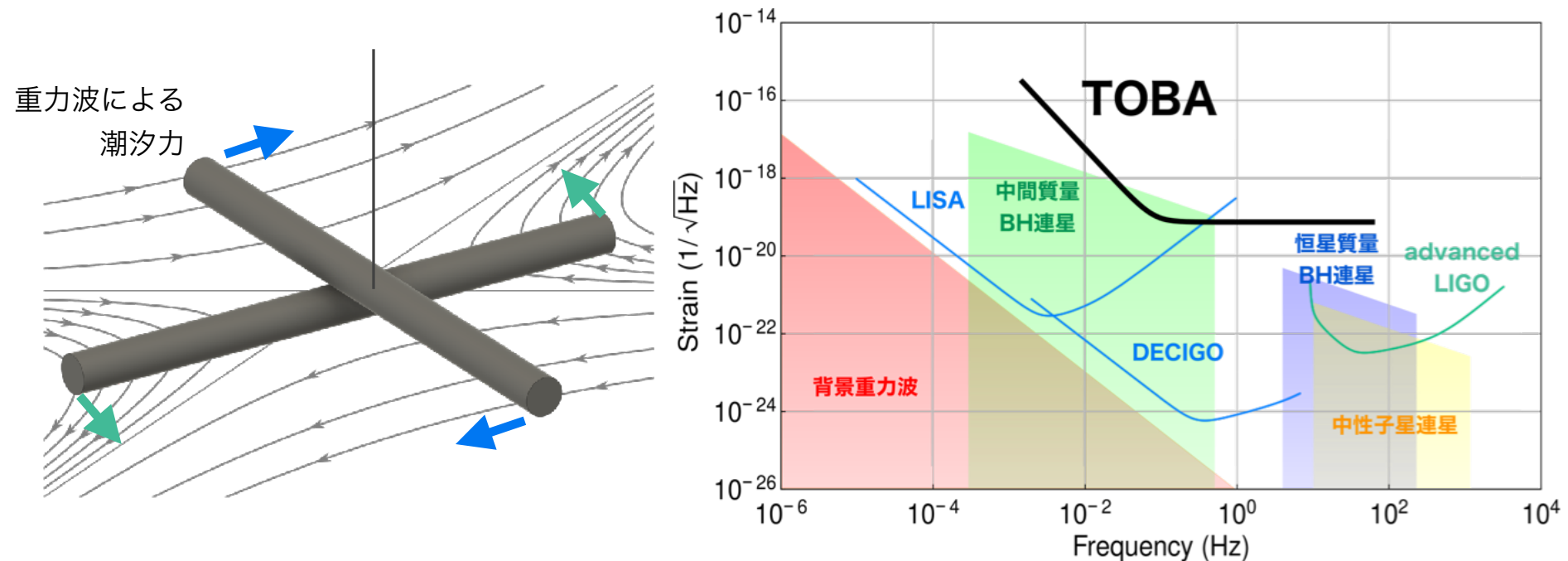
# Contents

- TOBAについて
- TOBAの読み取り光学系
- モノリシック光学系の要素開発
- まとめ, 今後の展望

# ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA

## ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA (TOrsion Bar Antenna)

- 水平に懸架した棒状マスのねじれ回転を検出
- 共振周波数~数mHz → **0.1-10 Hz**の低周波重力波の観測
- 地上で観測可能(宇宙に打ち上げる必要がない) → 低コスト
- 目標: 10mスケールで  **$h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz**



# 研究計画



## 現在: Phase-III TOBAの開発

- 低温ねじれ振り子の実証
- 障害となる雑音源の特定と低減

# Phase-III TOBAの構成

## 能動防振系

- ・地震計とアクチュエータによるフィードバック制御系
- ・角度変動を読む傾斜計

## 低温懸架系

- ・2段ねじれ振り子
- ・35 cm 試験マスx2
- ・50 Kと4 Kの2つの放射シールド

地震計

ヘキサポッド  
アクチュエーター

ファイバー  
レーザー

放射シールド  
(50K, 4K)

試験マス

真空槽

パルスチューブ  
冷凍機

## 読み取り光学系

- レーザー干渉計による角度読み取り
- モノリシック光学系

# 変位読み取り雑音の低減

## モノリシック光学系

：光学基板に光学素子を**直接貼り付ける**

- 同相雑音除去が効きやすい
- 長時間ドリフトが小さい
- **取り付け後の調整は不可能**

LISA Pathfinderでは

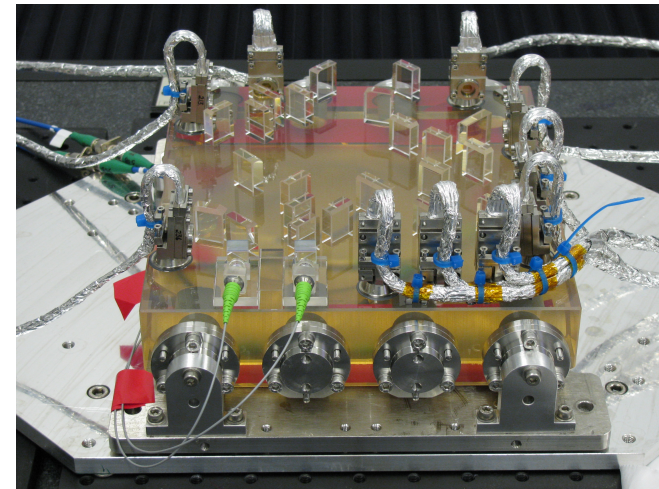
**$3.5 \times 10^{-14} \text{ m/rtHz}$  @ 0.1 Hz** を達成

## 低温下でのモノリシック光学系の実現

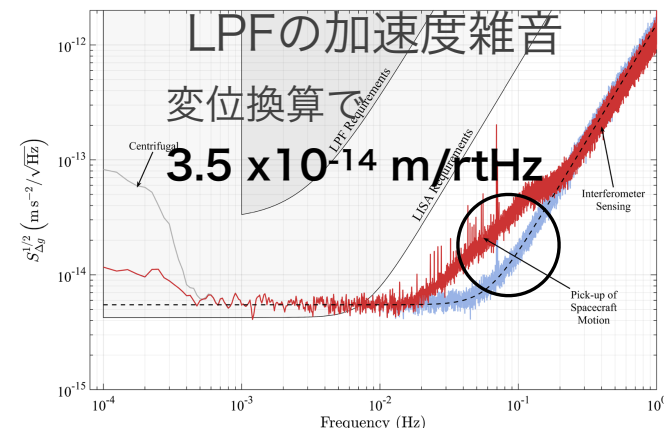
- 熔融石英は低温での性質が悪い  
(Q値, 熱膨張率)

▶ **シリコン基材 + シリコン光学素子**で構築

- 目標感度  **$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$  ( $3 \times 10^{-16} \text{ m/rtHz}$ )** を目指す



[LISA Mission Proposal](#)



[PRL 116, 231101 \(2016\)](#)

# 変位読み取り雑音

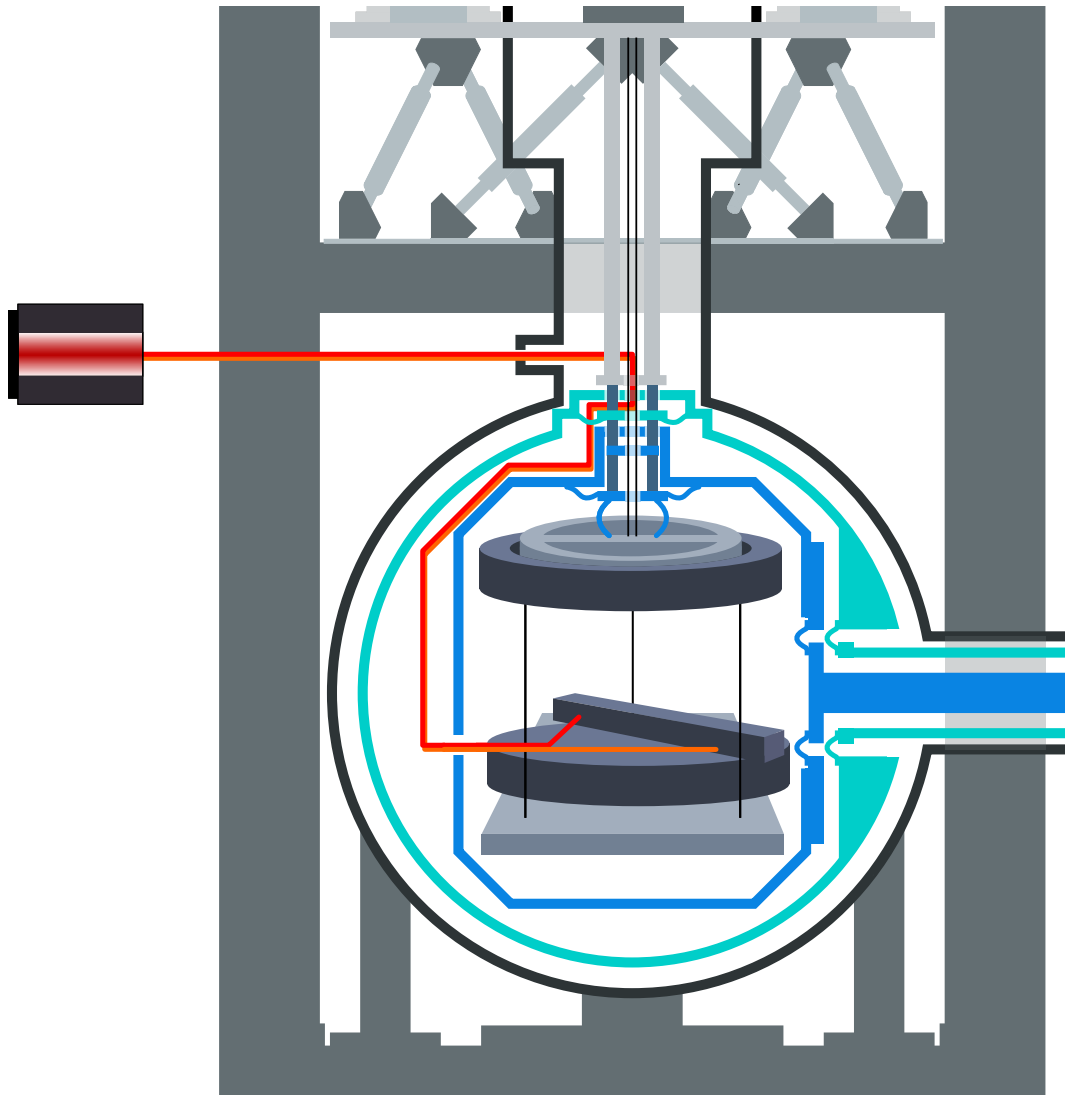
試験マスの読み取り系における雑音

- 原理雑音
  - 散射雑音
  - 鏡の熱雑音（コーティング・基材）
- 光学系
  - **光学系の変動**（地面振動・温度変動） → モノリシック干渉計で低減可能
- 信号系
  - 回路の雑音

読み取り雑音が**原理雑音**で制限される干渉計を目指す



# 実験系概要



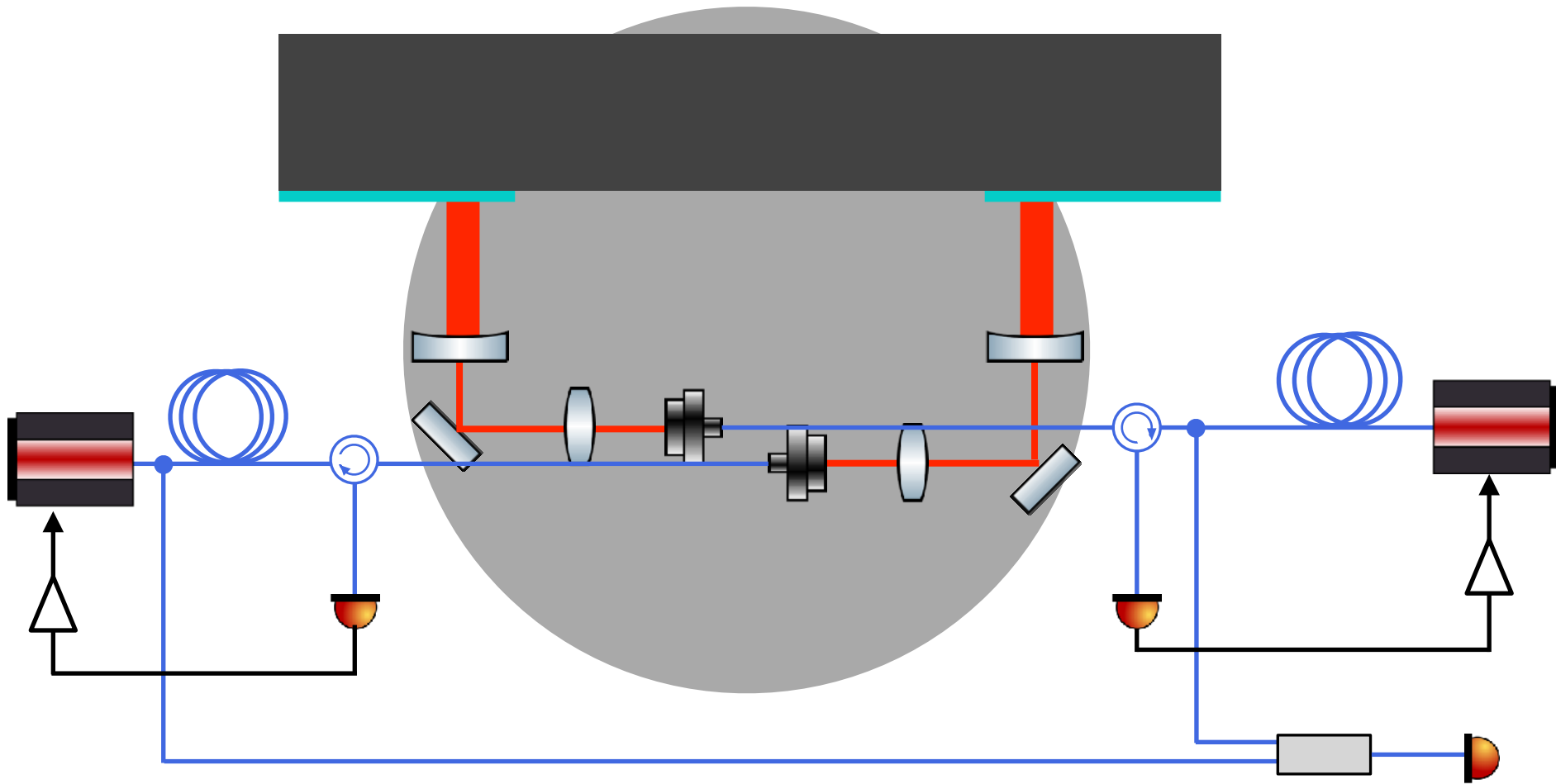
## 構成の簡略化

- 試験マスは懸架せず、**光学ベンチ上に1つ固定**
- 光学ベンチは2段振り子
- レーザーは光ファイバーを用いて導入

## 目的

- **低温下での運転の実現**
- 変位雑音評価
- 能動防振系を用いて**同相雑音除去比**の評価

# 光学系デザイン



# 光学系デザイン

低温下

試験マス (固定)

2つのFP共振器  
F~1000

試験マスの両端に  
反射コーティング

ファイバー

レーザー2

レーザー1

モノリシック  
光学系ベンチ

カプラー

シリコン製

光学素子,  
基材, 試験マス

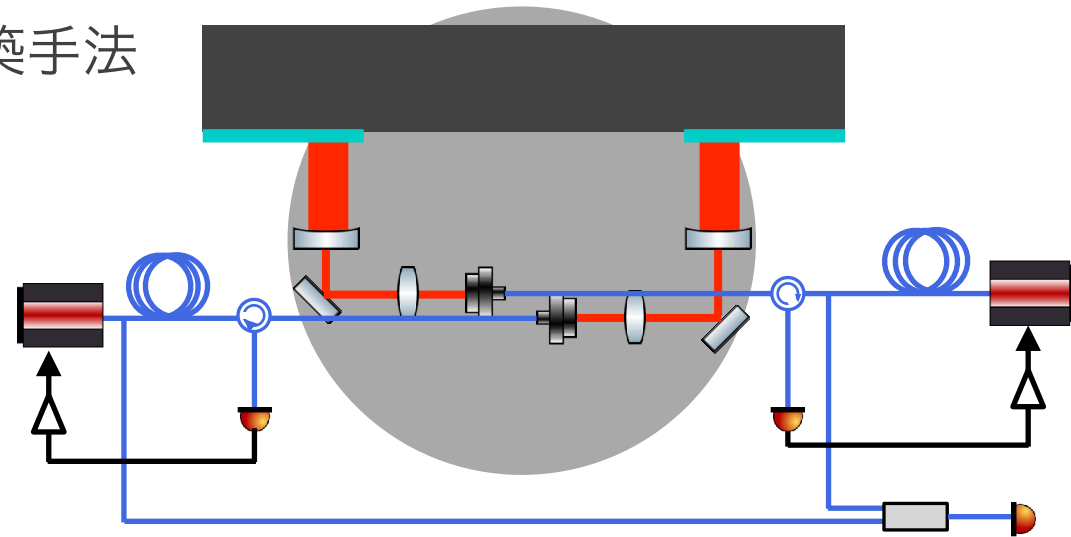
低温インバー製

コリメーター  
ホルダー

2台のレーザーの周波数差  
から両腕の差動変動

# 開発項目

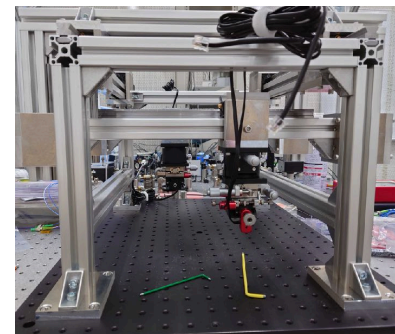
- モノリシック光学系の構築手法
  - 接着方法
  - アライメント方法
- 低温における動作
  - コリメーター
  - アライメントずれ
  - PDの動作（透過光，強度モニター用， etc.）
- 光学系の雑音レベルの測定
  - 測定系（レーザー，電気回路，…）



目標感度：  $10^{-16}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$

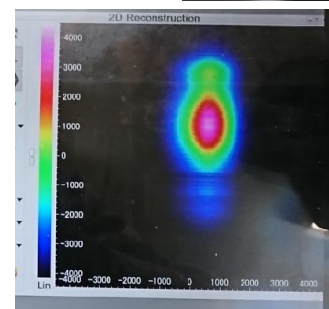
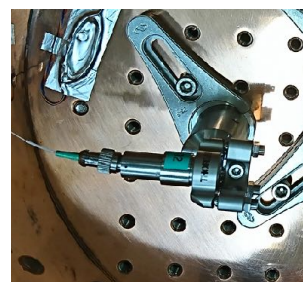
# 開発項目

- モノリシック光学系の構築手法
  - 接着方法 → エポキシ系接着剤
  - アライメント方法



- 低温における動作

- コリメーター → 動作確認
- アライメントずれ



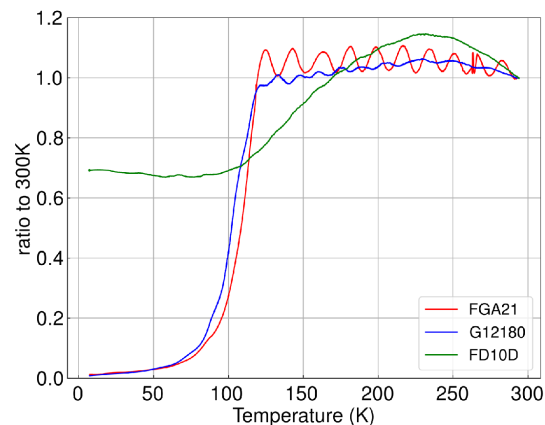
- PDの動作（透過光，強度モニター用，etc.） → 動作確認

- 光学系の雑音レベルの測定

- 測定系（レーザー，電気回路，…）

光学系構築の目処はおおむね立っている

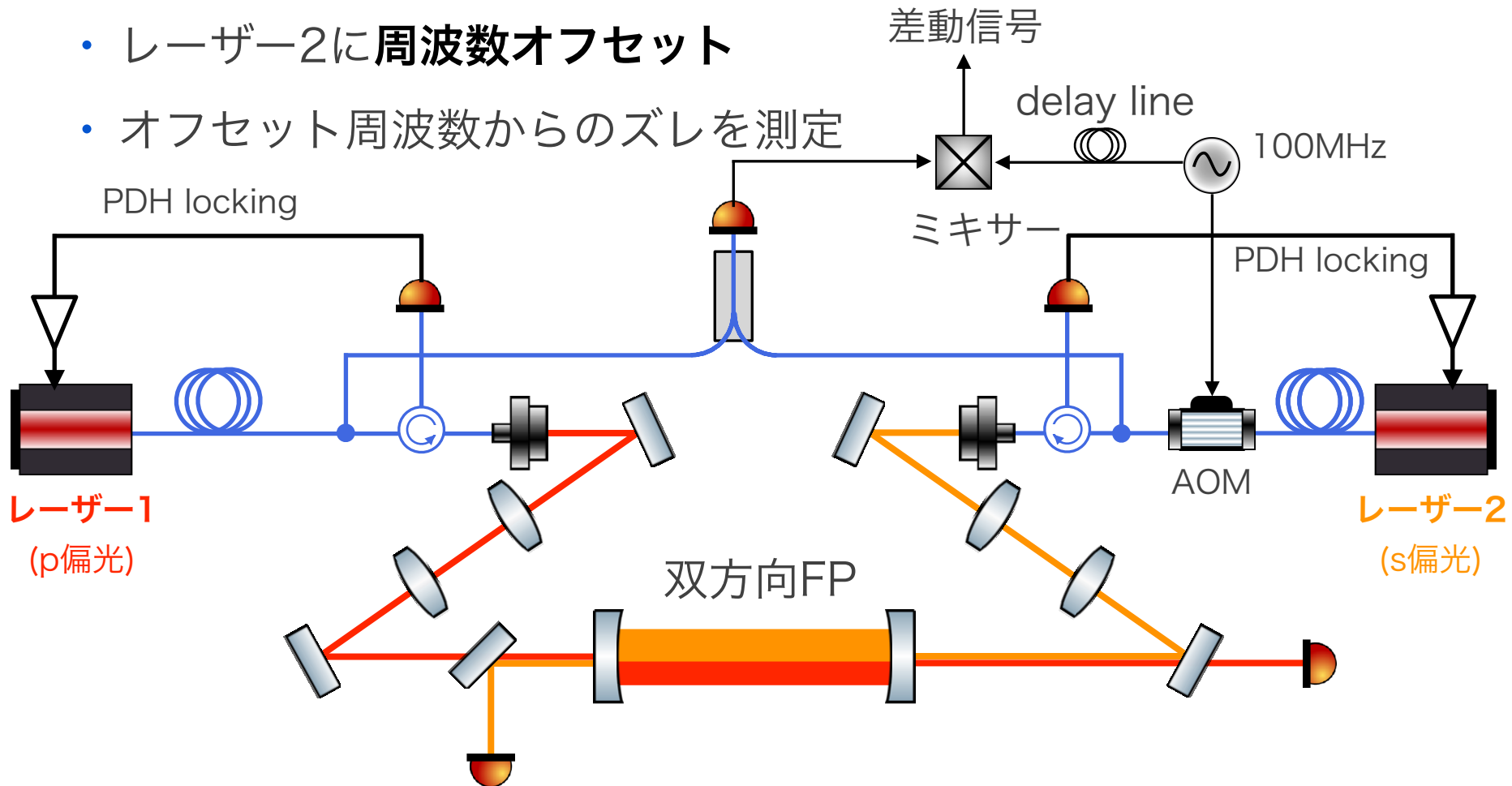
- ▶ 測定系の特性評価



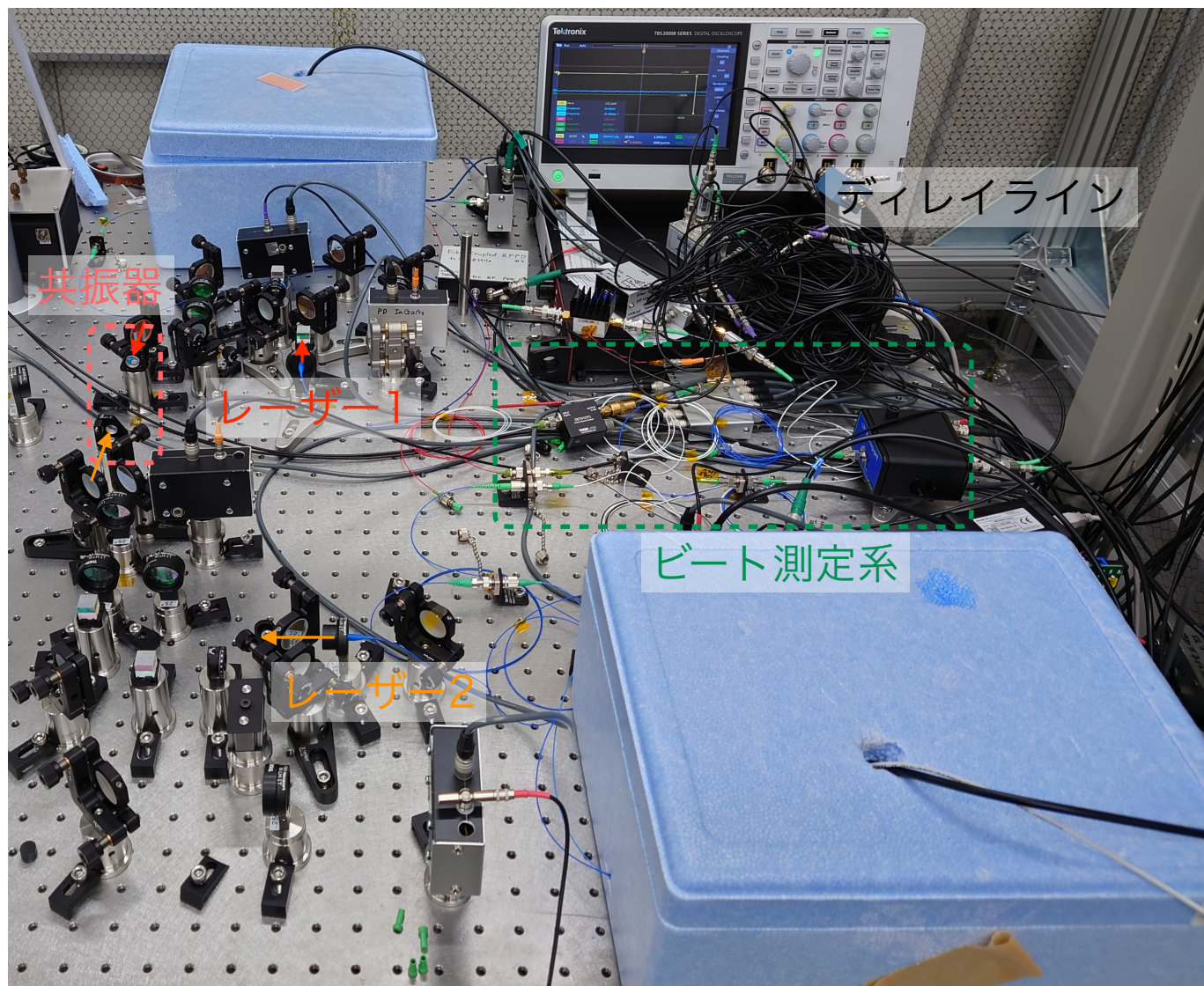
# 周波数差測定

## 双方向Fabry-Perot共振器を用いた評価

- レーザー1とレーザー2は同じFSRにロック
- レーザー2に**周波数オフセット**
- オフセット周波数からのズレを測定



# セットアップ



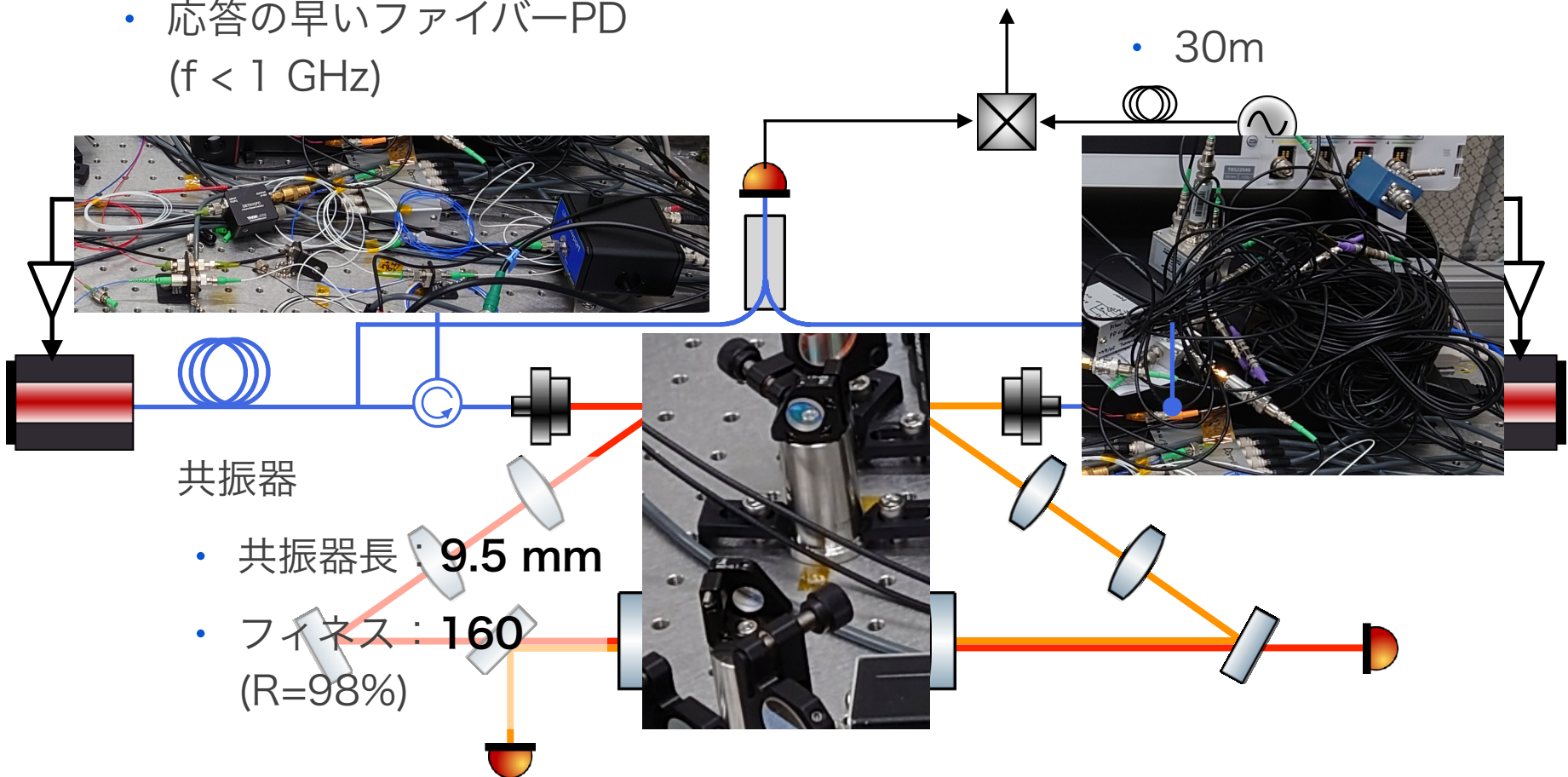
# セットアップ

## ビート信号測定

- **ファイバーカプラー**で結合
- 応答の早いファイバーPD ( $f < 1 \text{ GHz}$ )

## ディレイライン

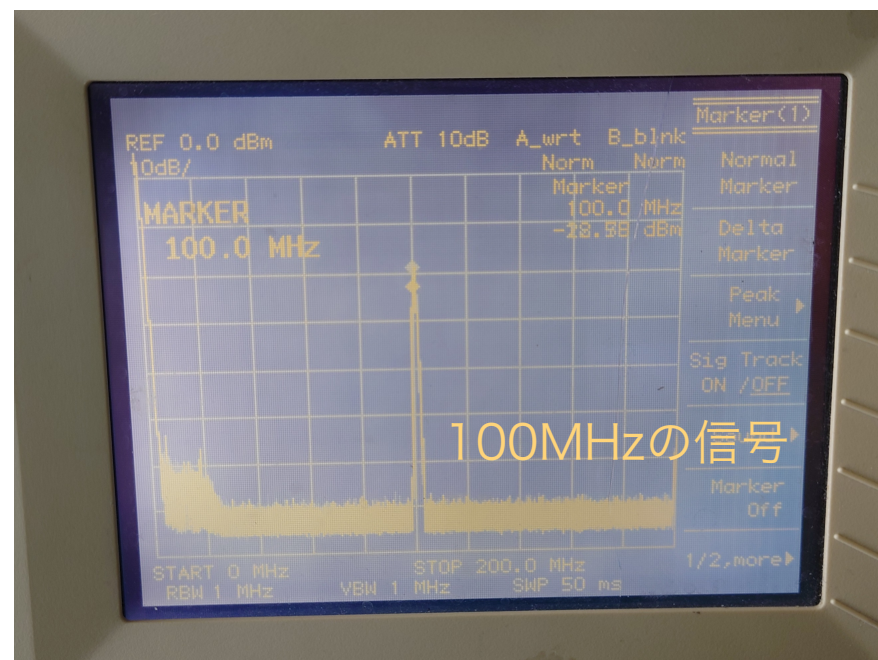
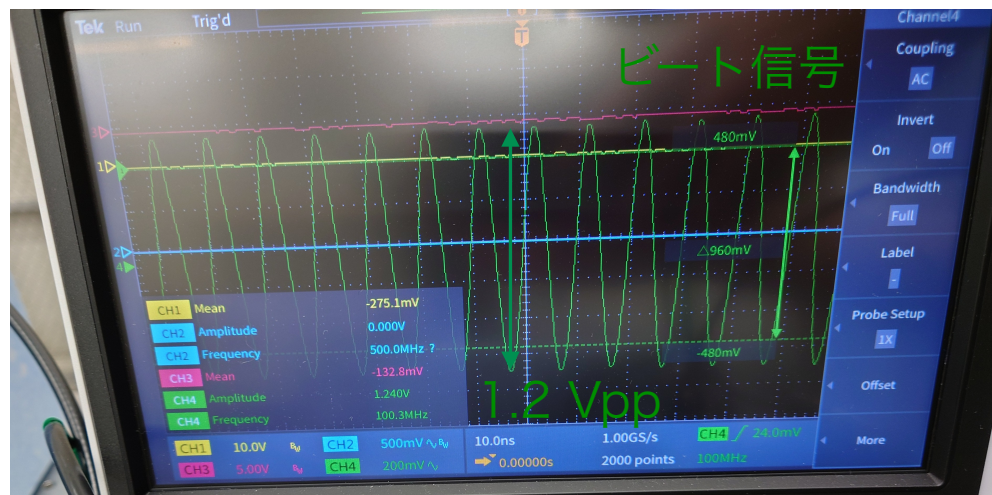
- LEMOケーブルで調整
- 30m





# ビート信号の観測

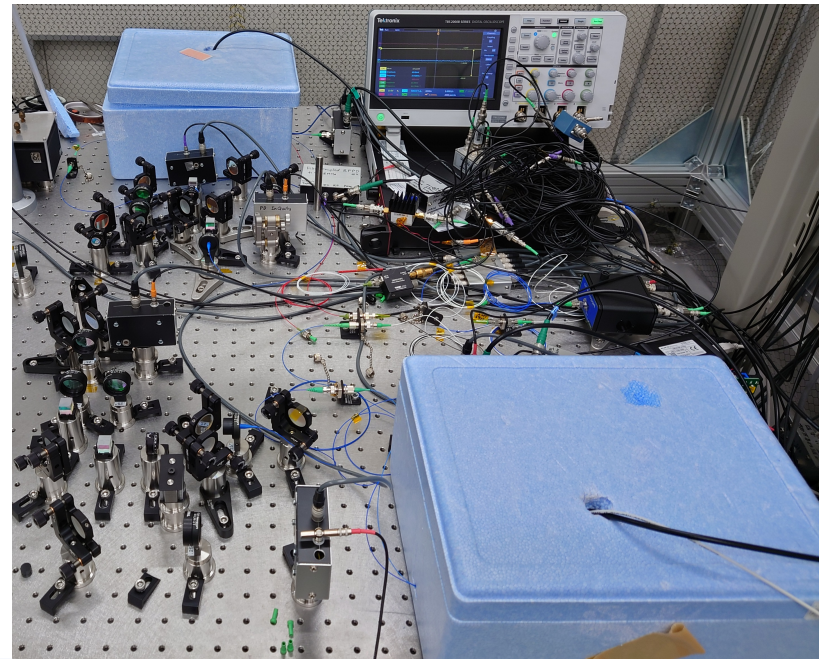
- 100 MHzでビート信号が見えたことを確認
- 共振器の制御に問題あり
  - UGFでの位相余裕が設計よりも小さい ( $\sim 10^\circ$ )
  - 50 kHz程度に共振 (レーザーのピエゾ)



制御系の改善を行い，差周波測定の評価を定量的に行う

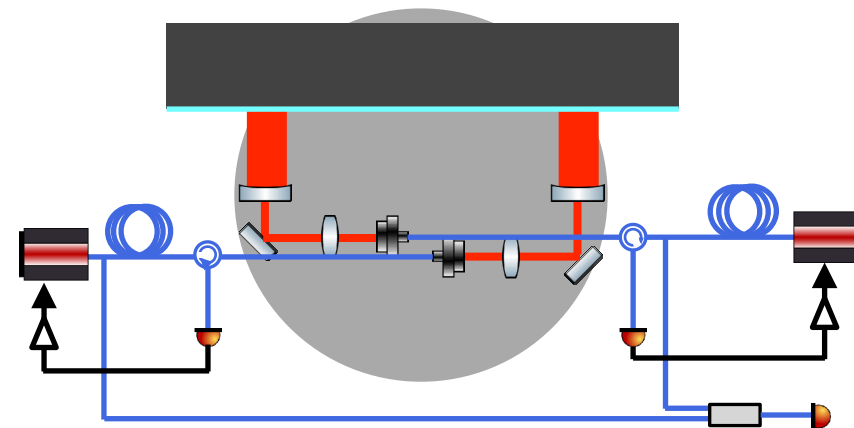
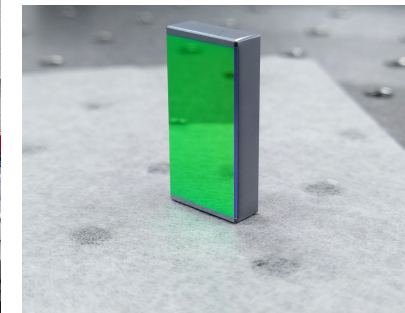
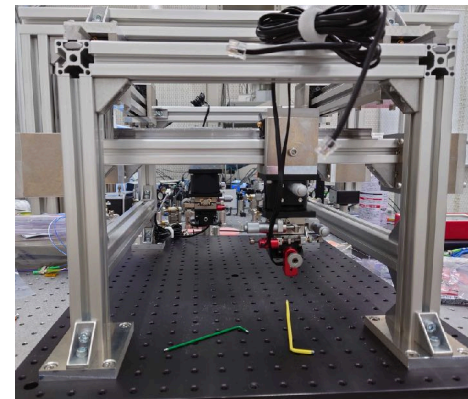
# まとめ

- 低周波重力勾配測定に向けてPhase-III TOBAの開発
- 高感度化に向けた低温モノリシック干渉計の開発
- 光学系構築に必要なものの評価はおおむね完了
  - 実際にモノリシック光学系の構築を行う
- 2つの共振器の差動変動の測定の特性評価
  - 双方向FP干渉計を構築
  - 周波数がずれている分のビート信号が確認
  - 共振器制御の最適化, ビート信号の定量的評価



# 今後の展望

- モノリシック光学系の構築
  - 予備の光学系を用いてアSEMBリの方法確認
  - 光学系の構築
- ビート信号の特性評価
  - S/N比
  - レーザーの安定度
- 低温試験
  - 感度  $10^{-16}$  rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$  を目指す

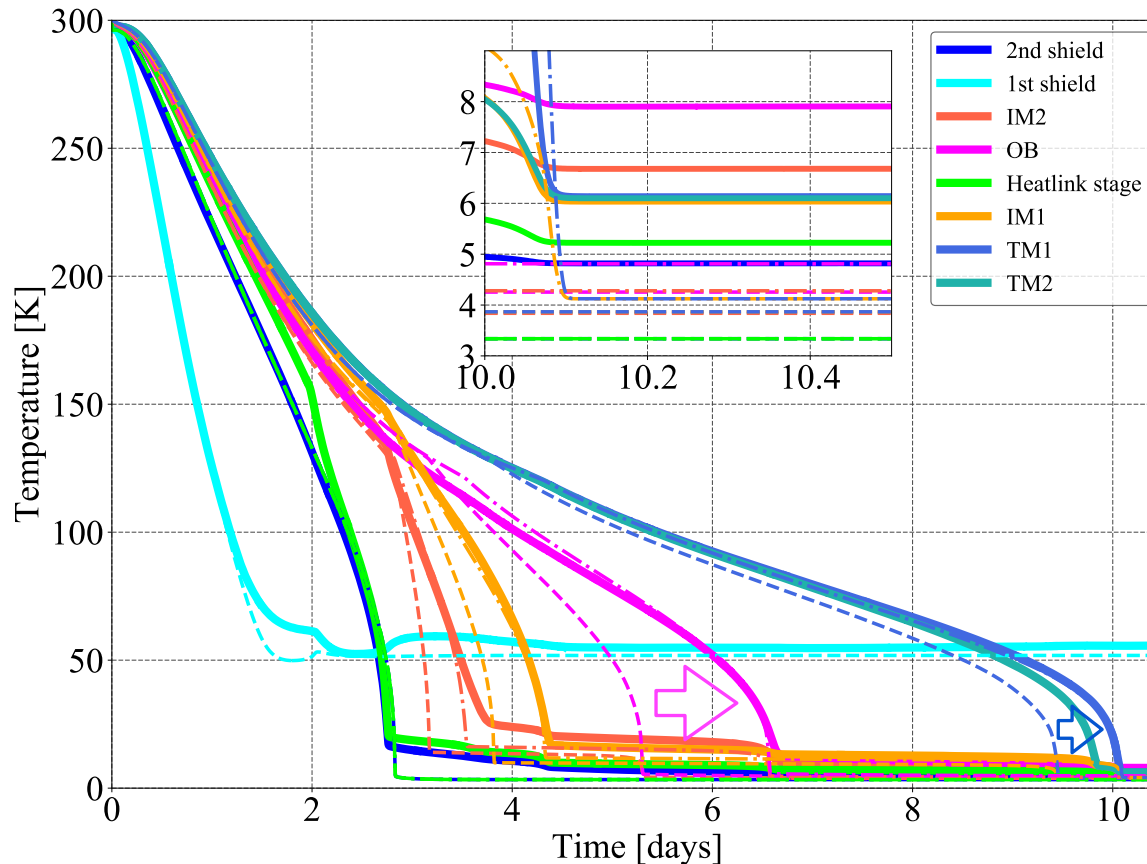




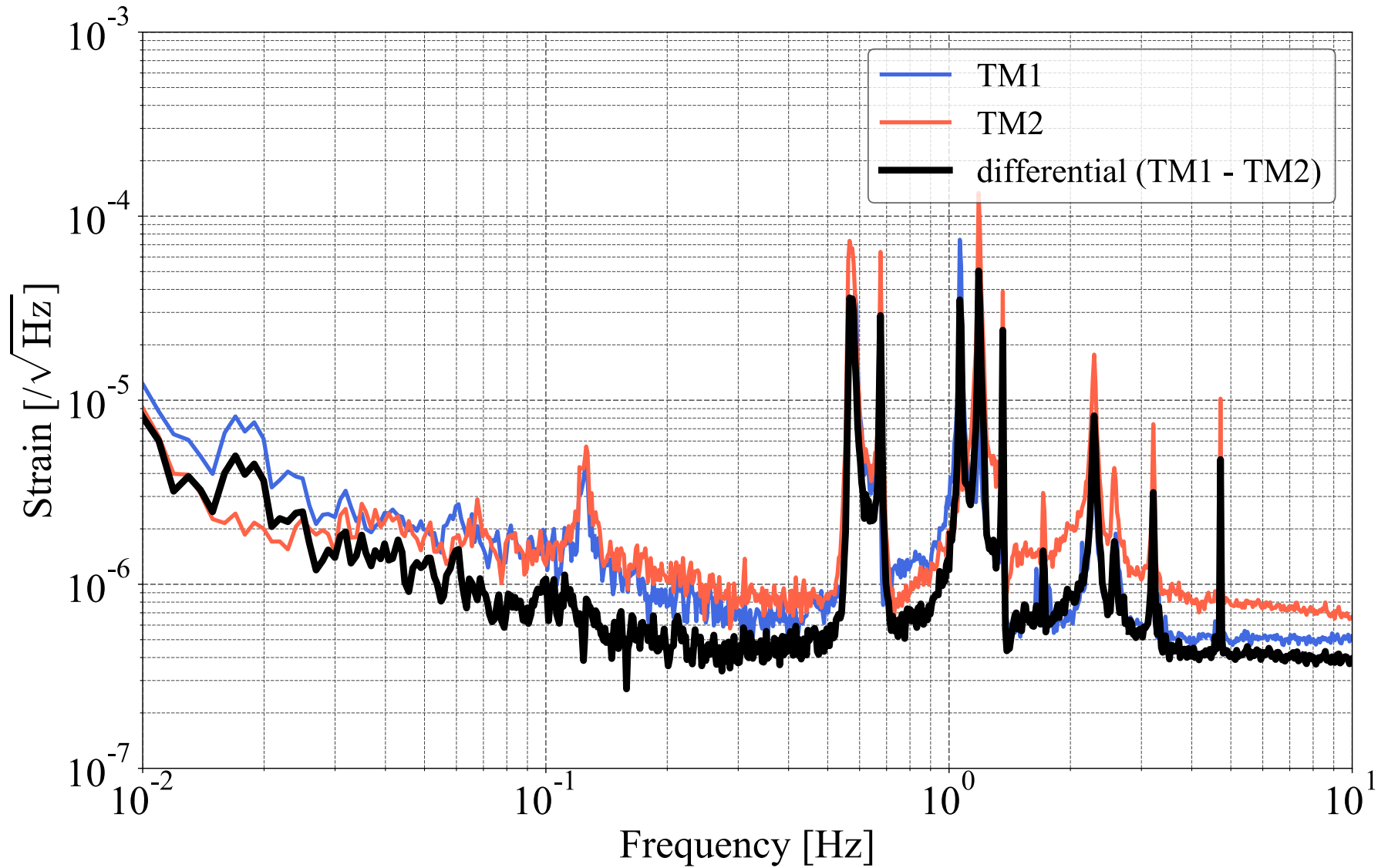


# 冷却結果

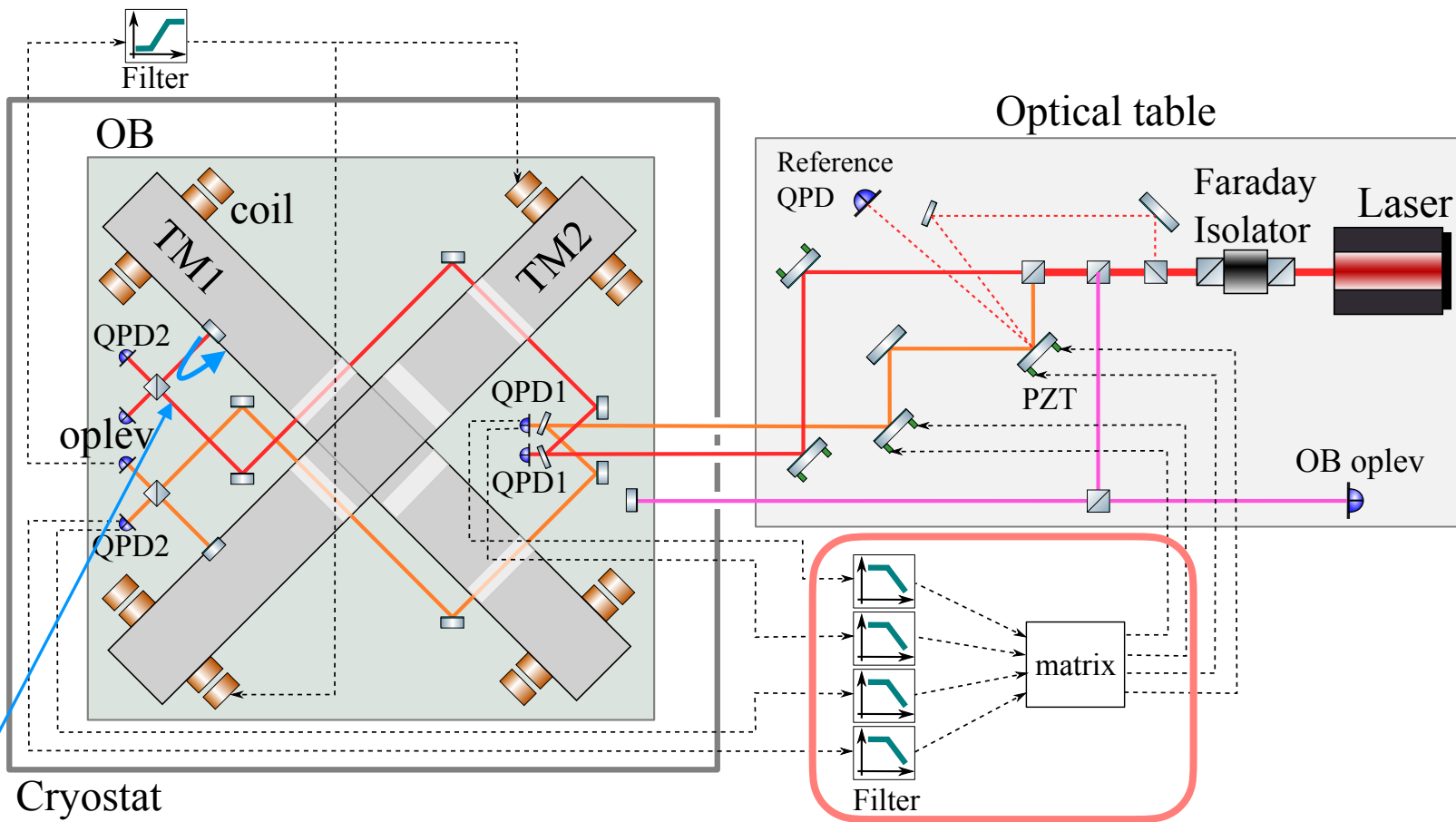
- 6.1 Kまでの冷却に成功 (4 Kの場合より1.2倍の熱雑音)
- 理論よりも冷却速度が遅い
- ▶ ヒートリンクの熱接触が想定よりも悪い



# 現在の感度



# ビームジッター，迷光



迷光雑音：

BSの表面反射などによる迷光が計測信号と干渉し，強度変動を起こす雑音

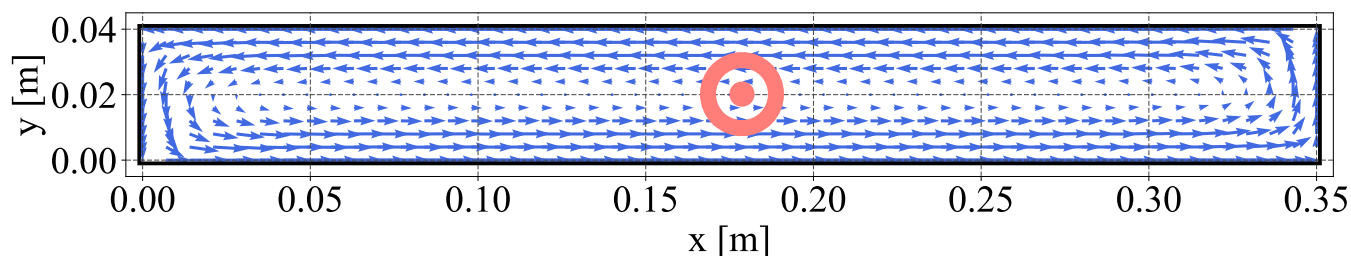
ビームジッター制御雑音：

ビームジッターの制御信号に強度変動などの信号が混入し，制御を介して逆にビームを揺らしてしまう



# 磁場雑音

- 環境磁場変動による誘導電流が試験マスに流れ、磁気モーメント  $\mu$  をもつ
- 環境磁場のDC成分  $B$  とカップルし、トルク雑音  $N=B \times \mu$  が生じる



- $\mu$  は電気伝導度に比例
  - ▶ 低温になるほど寄与が大きくなる
- 現状  $10^{-9} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - ▶ 目標感度  $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$  達成には6桁の低減が必要

# 低温試験

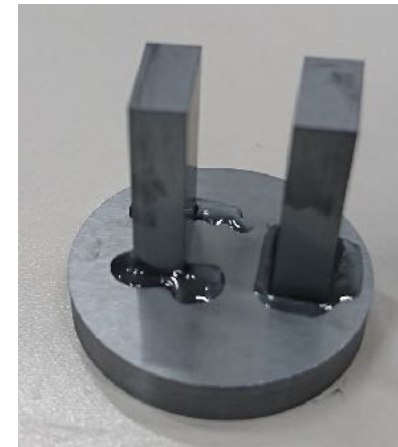
シリコン同士を

- Stycast 1266
- DP190

エポキシ

- NOA63
- NOA81

紫外線硬化樹脂



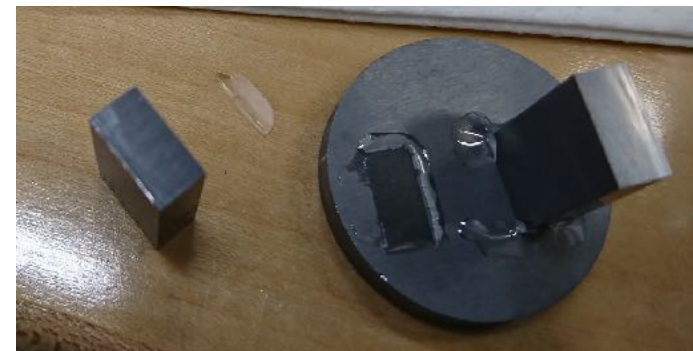
冷却&  
昇温後



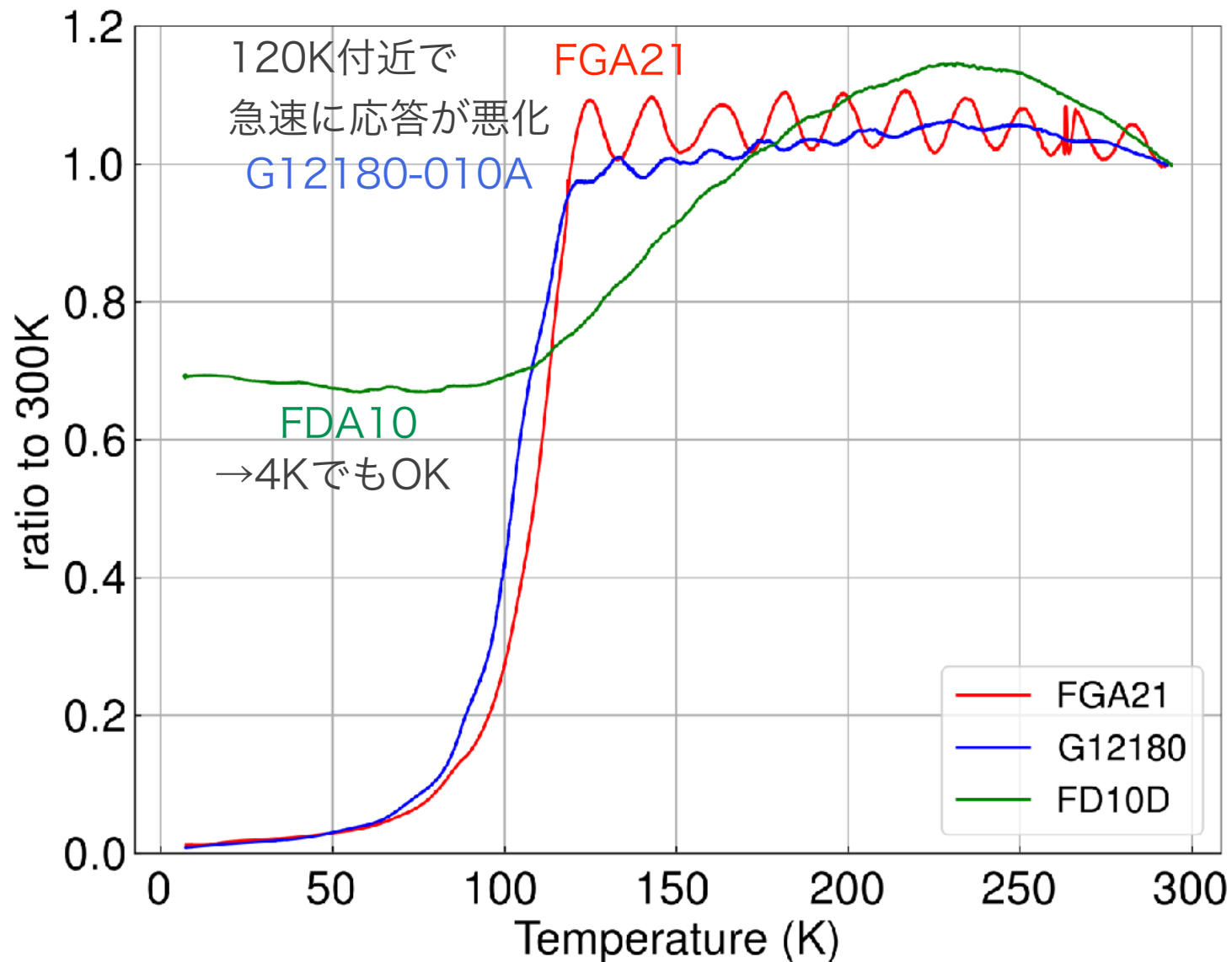
で接着し，4Kまで冷却

- ▶ 紫外線硬化樹脂は昇温後に剥離
- ▶ エポキシは昇温後も問題なし

**エポキシでの接着を採用**



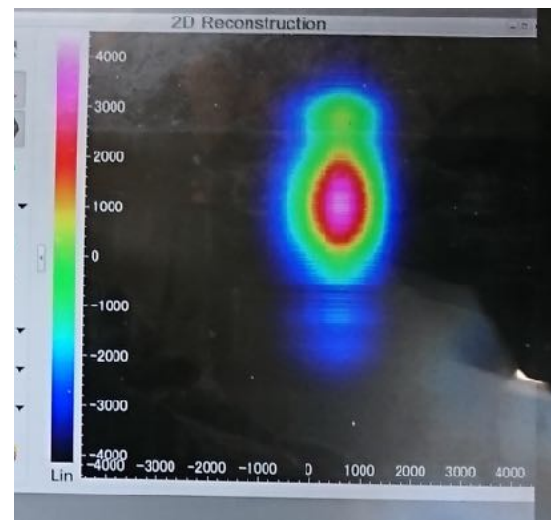
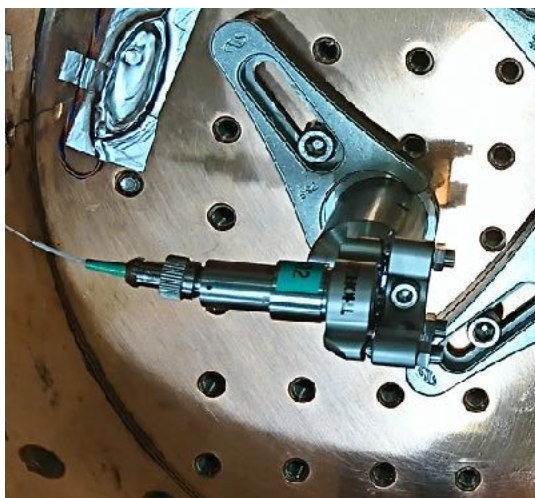
# フォトダイオード



# コリメーター

焦点固定コリメーター（F260APC-1550, Thorlabs）を使用

- 何度か冷却&昇温を繰り返していると出射ビームの形が変化



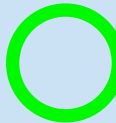















- 他の種類のコリメーターでも同様の現象
  - ▶ 低温化でレンズの位置が変化した可能性

現在はピグテールコリメーターを使用

- 今のところビームの形に異常はない

# 干渉計構成

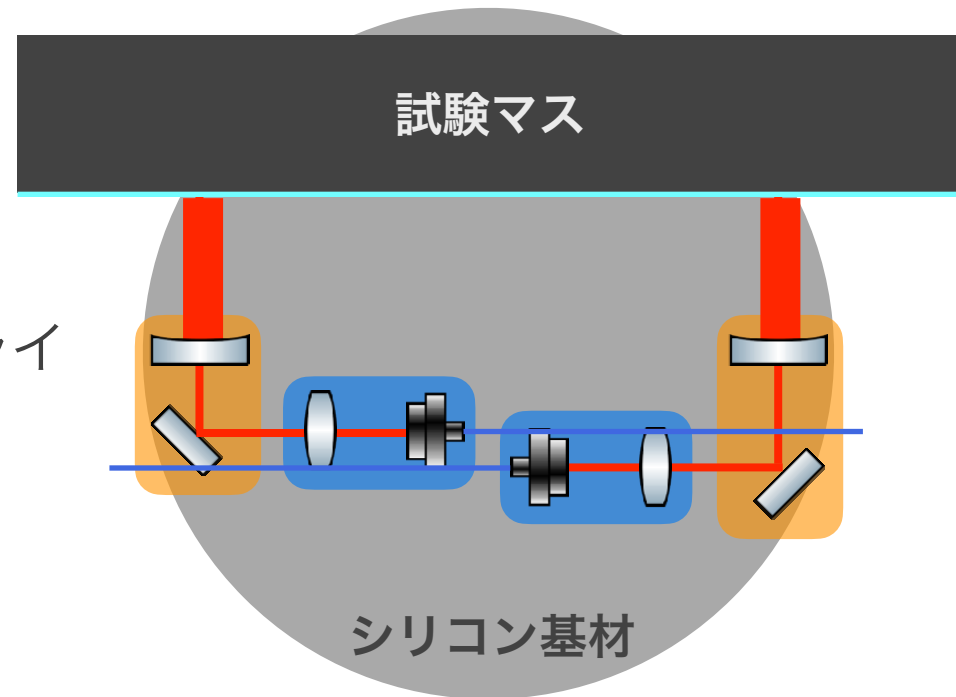
	Michelson 干渉計	差動 Fabry-Perot	Fabry-Perot Michelson	改良型WFS
感度				 ?
周波数雑音				 ?
ビーム ジッター				 ?
並進 カップル				 ?
制御 自由度	1 (ねじれ回転)	2 (ねじれ回転, 並進運動)	3 (ねじれ回転, 並進運動, Michelson)	2 (ねじれ回転, 並進運動)

改良型WFSがベストだが不確定要素が多い → 差動FPを採用

# アラインメント手法

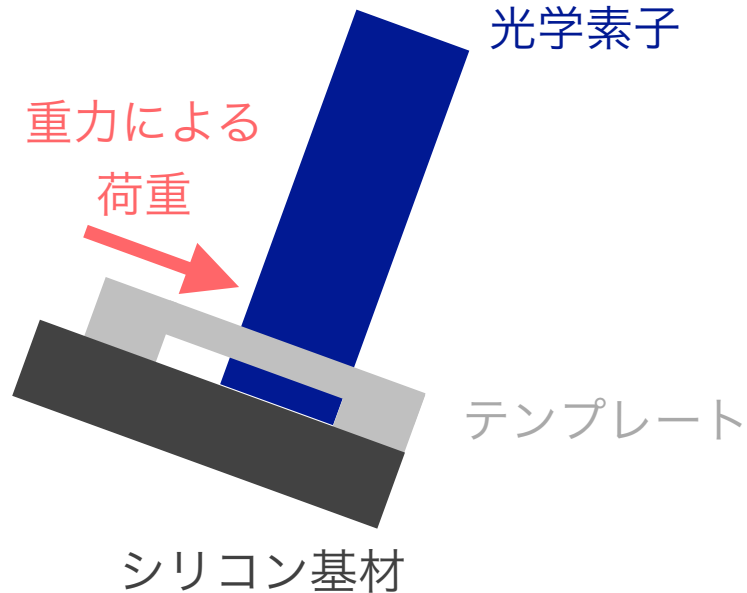
要求精度の異なる2パターンの光学系

- 取り回し, ピックオフ,  
モードマッチング
  - 精度低め ( $\sim 1$  mrad)
    - ▶ テンプレートを用いてアラインメント
  - 共振器鏡, 入射鏡
    - 精度高め ( $\sim 10$   $\mu$ rad)
      - ▶ 共振状態を確認しつつ,  
専用のステージで微調整

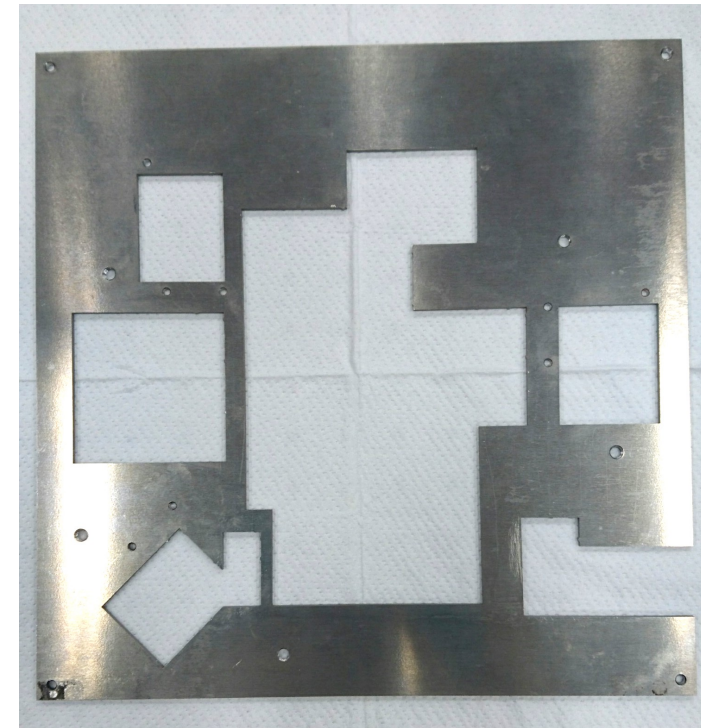


# テンプレートを用いたアライメント

- 突起のついた板に、光学素子を押し付けるような形で固定
- 全体を傾けることで荷重をかける

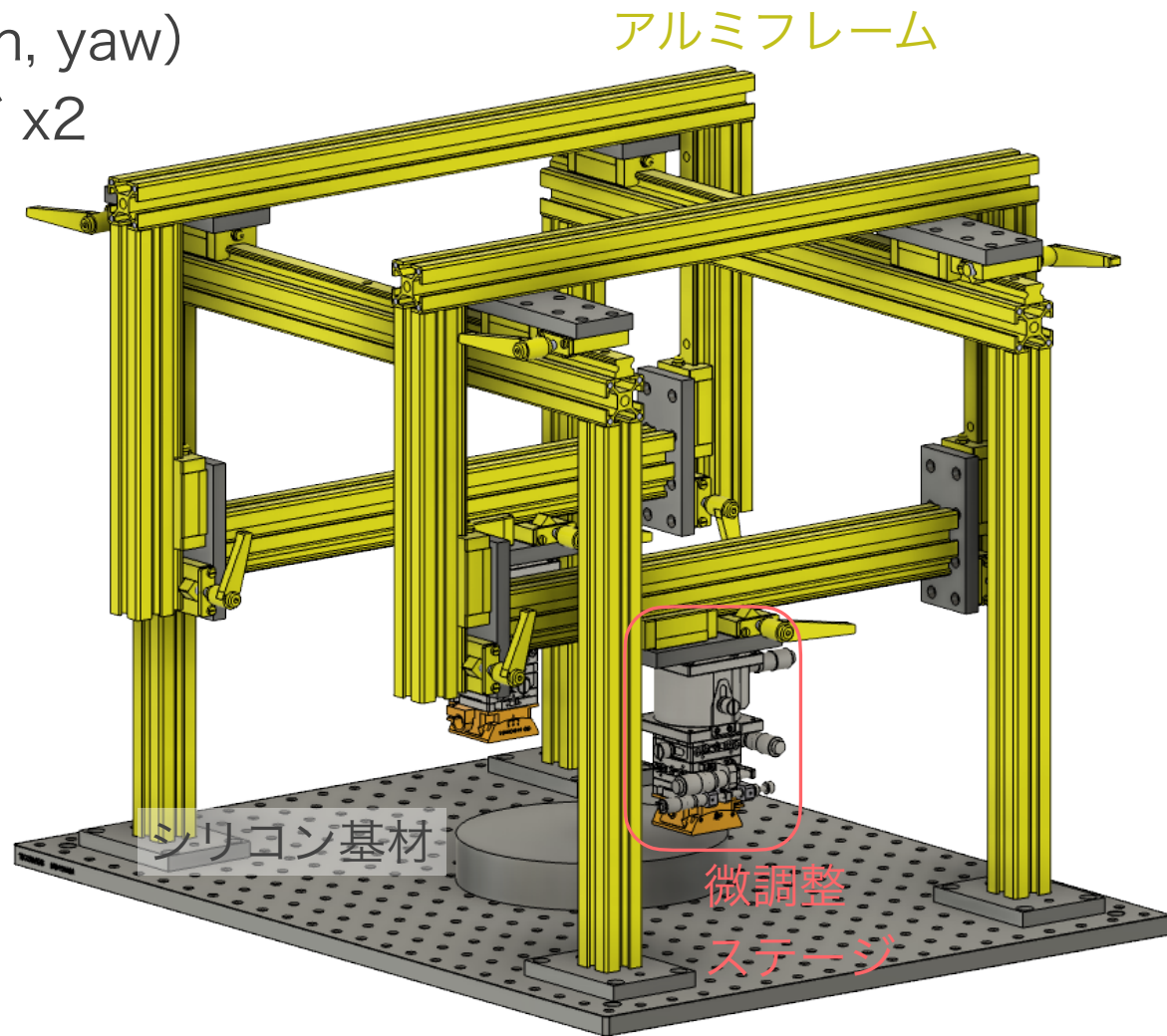
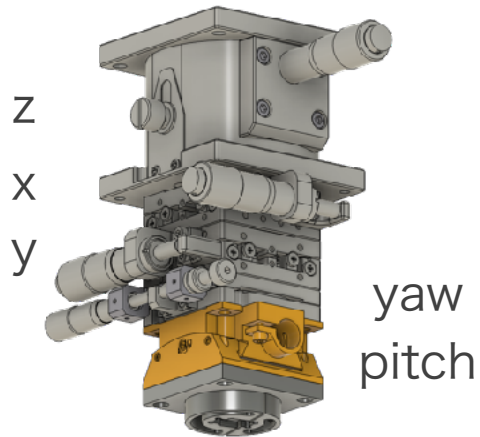


- 現在はテンプレートを設計中



# ステージを用いた微調整

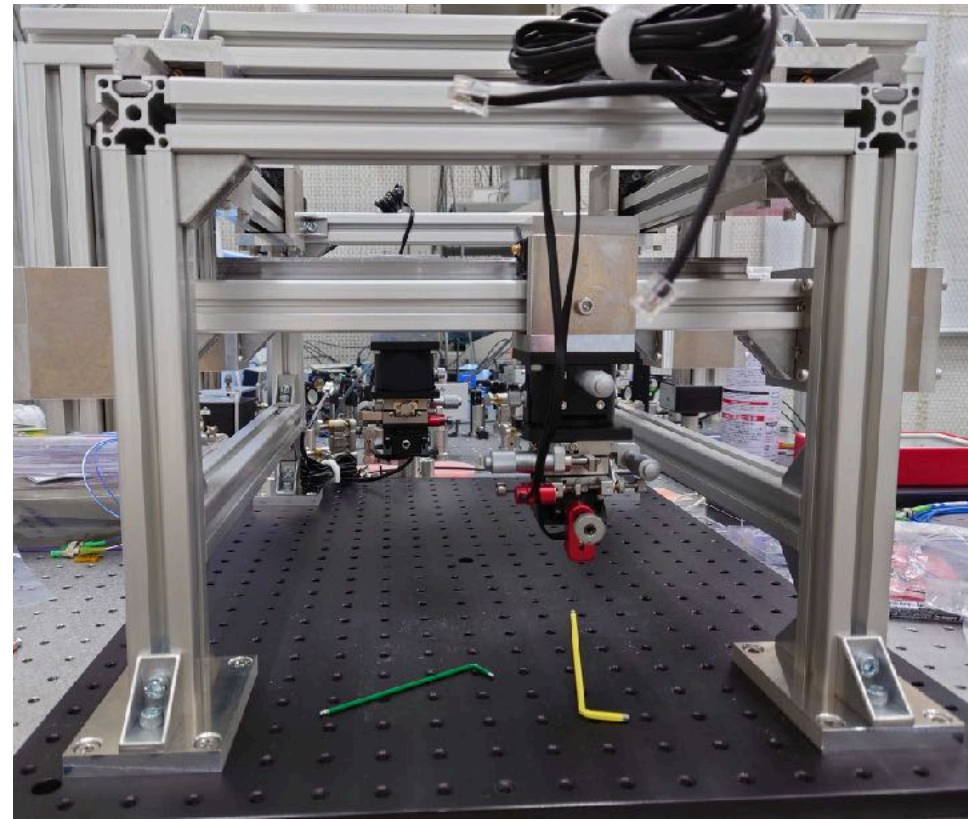
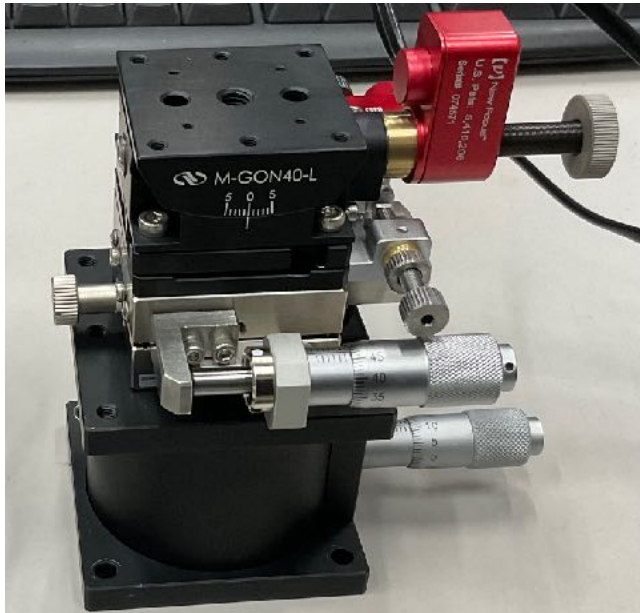
- 5自由度 (x, y, z, pitch, yaw) に移動可能なステージ x2
- リニアガイドで粗調 (x, y, z)
- 手動ステージで微調 (x, y, z)
- 電動ステージで微調 (pitch, yaw)



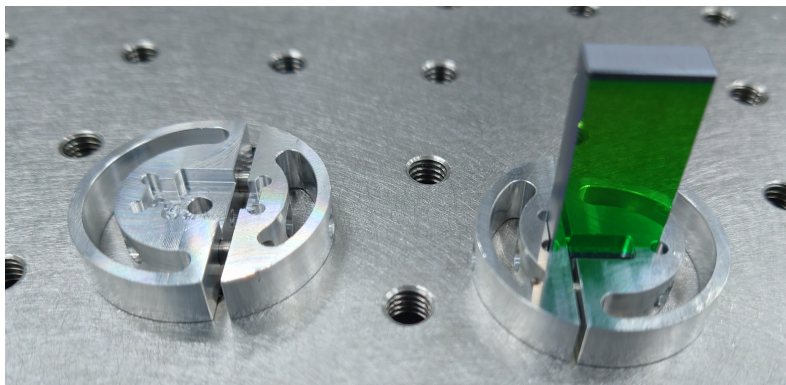


# 微調整ステージ

微調ステージ



ステージ全体



光学系ホルダー

# 動作確認

ダミー光学系を用いて動作確認

