

ねじれ振り子型重力波望遠鏡

TOBAの開発(38):

低温モノリシック干渉計の開発と観測

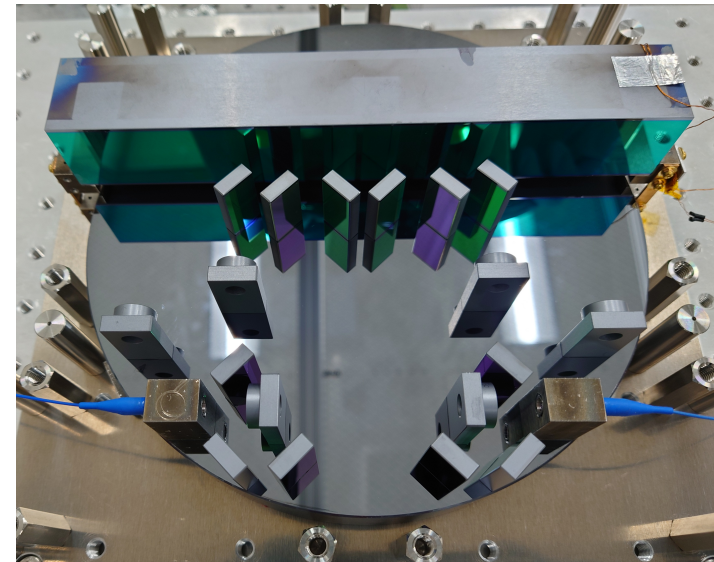
高野 哲, 大島 由佳, Ooi Ching Pin, Choi Minseo, Cao Mengdi^A,

道村 唯太^{B,C}, 小森健太郎^C, 安東 正樹

東大理, 北京師範大天文^A, カリフォルニア工科大学^B, 東大ビッグバン^C

概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA を用いた0.1 Hz帯の重力波の検出を目指している
- Phase-IIIと呼ばれる低温ねじれ振り子のプロトタイプを開発中
- 高感度化に向けて、モノリシック読み取り光学系の開発
 - モノリシック光学系の構築を一部完了
 - 干渉計のアライメントを行っている



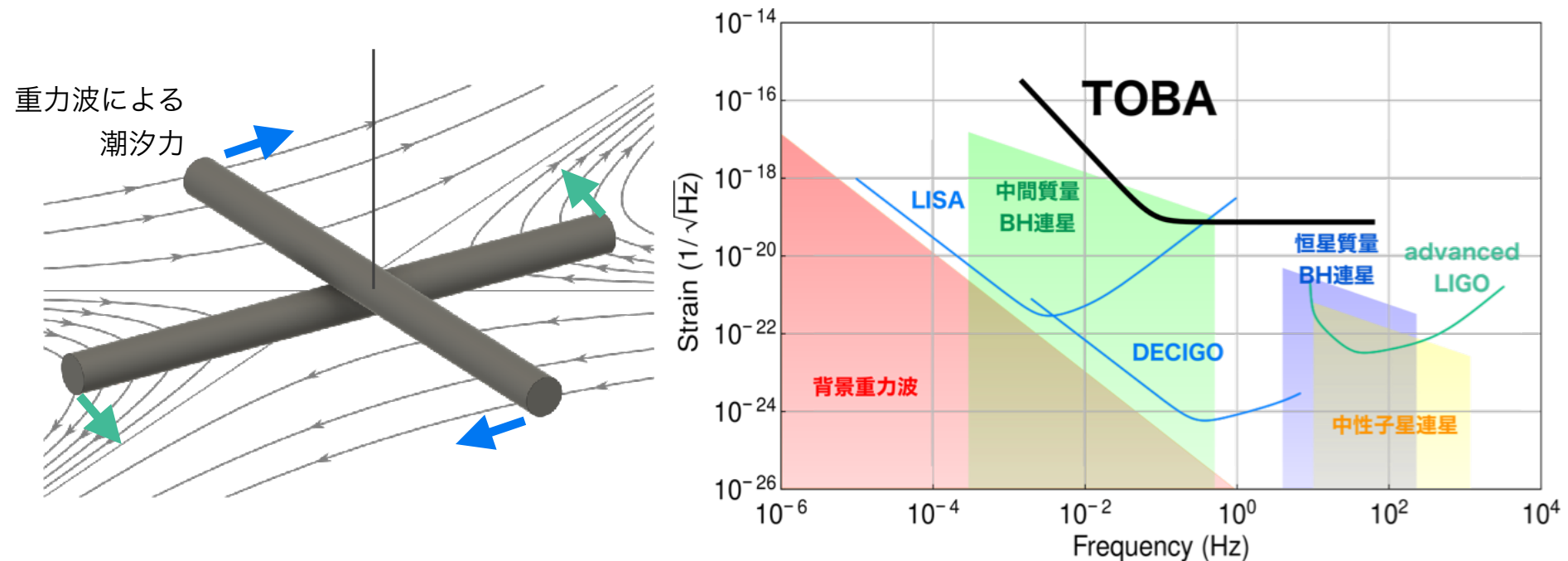
Contents

- TOBAについて
- TOBAの読み取りモノリシック光学系
- モノリシック光学系の構築
 - ▶ 光学系デザイン
 - ▶ 光学素子
 - ▶ アライメント
- まとめ, 今後の展望

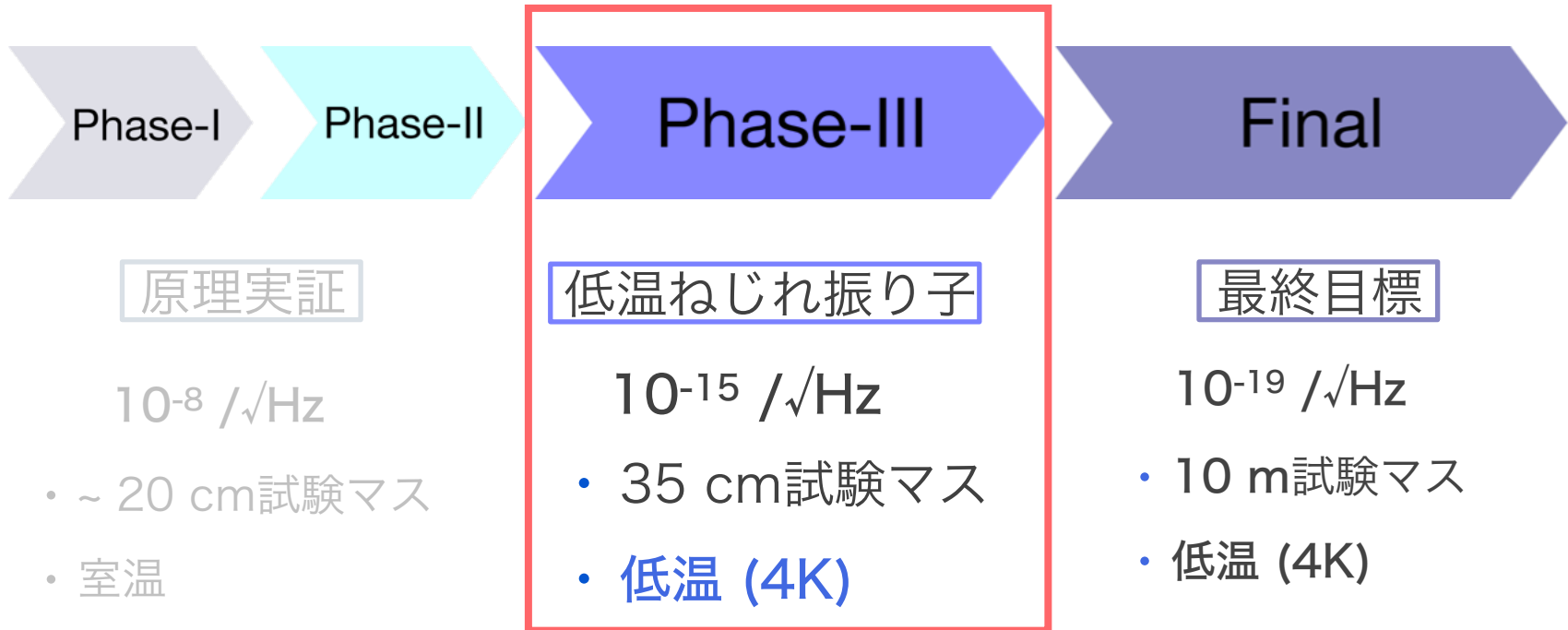
ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA

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

放射シールド
(50K, 4K)

ファイバー
レーザー

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

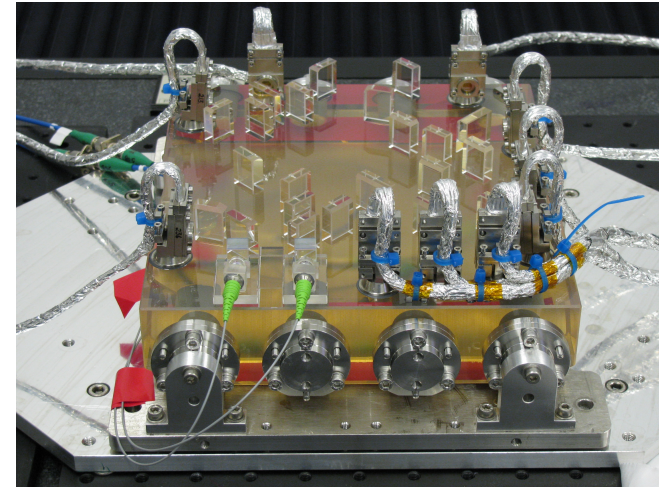
$3.5 \times 10^{-14} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz を達成

低温下でのモノリシック光学系の実現

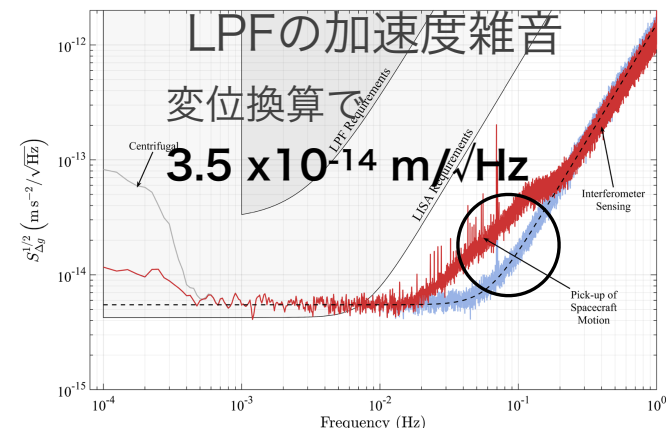
- 熔融石英は低温での性質が悪い
(Q値, 熱膨張率)

▶ **シリコン基材 + シリコン光学素子**で構築

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



[LISA Mission Proposal](#)



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

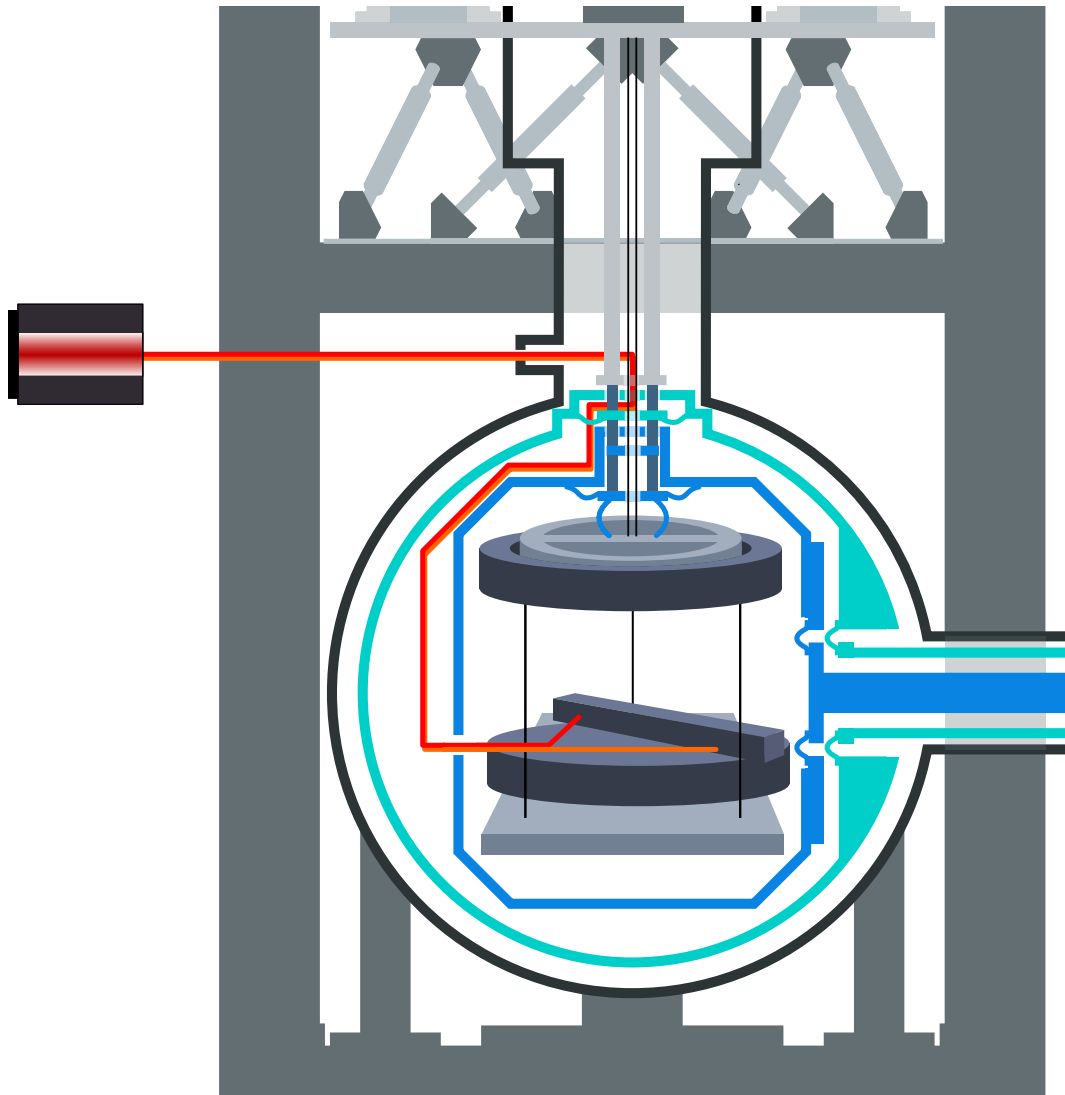
変位読み取り雑音

試験マスの読み取り系における雑音

- 原理雑音
 - 散射雑音 → Fabry-Perot 干渉計
 - 鏡の熱雑音（コーティング・基材） → 低温化
- 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



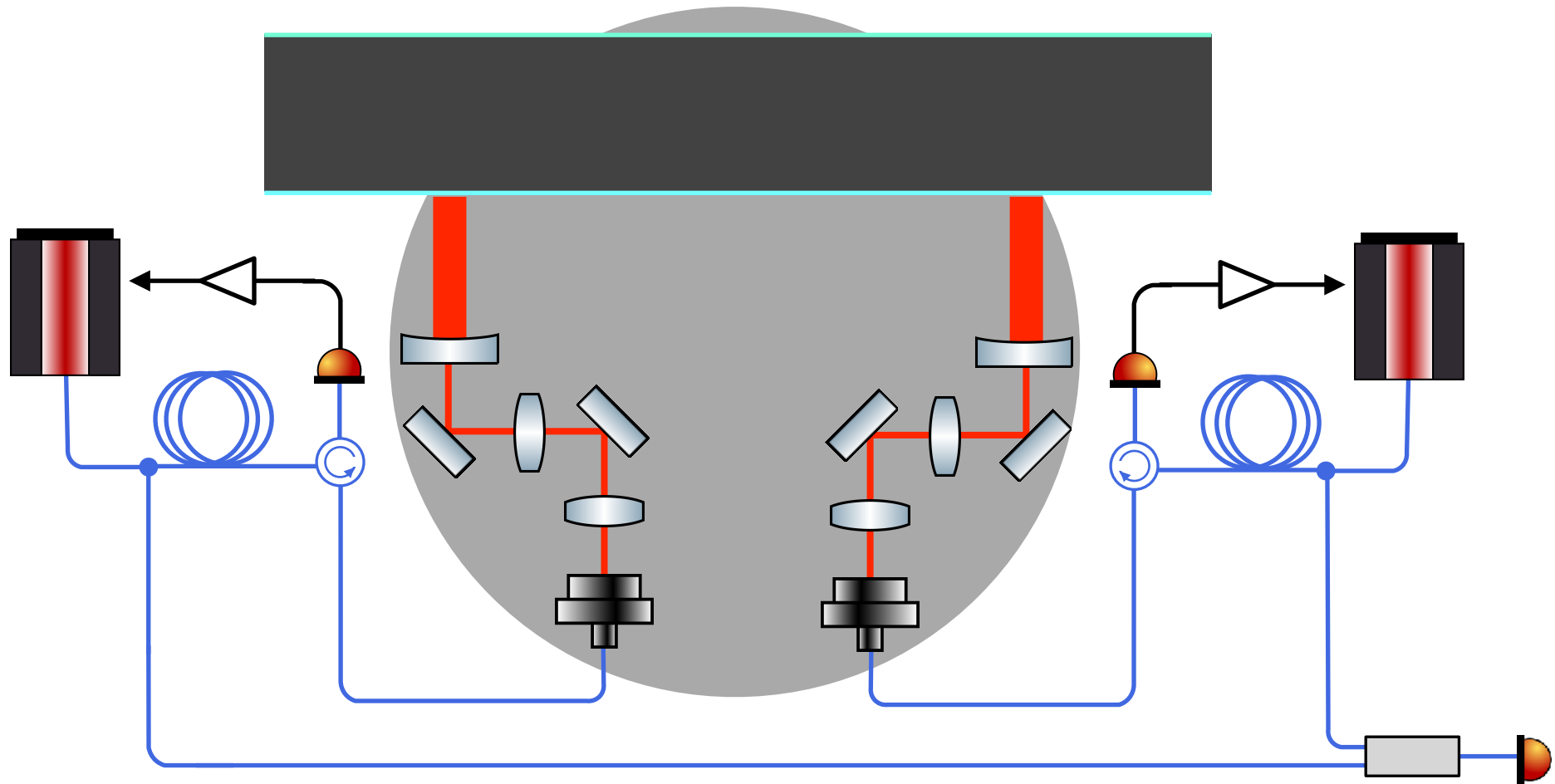
構成の簡略化

- 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

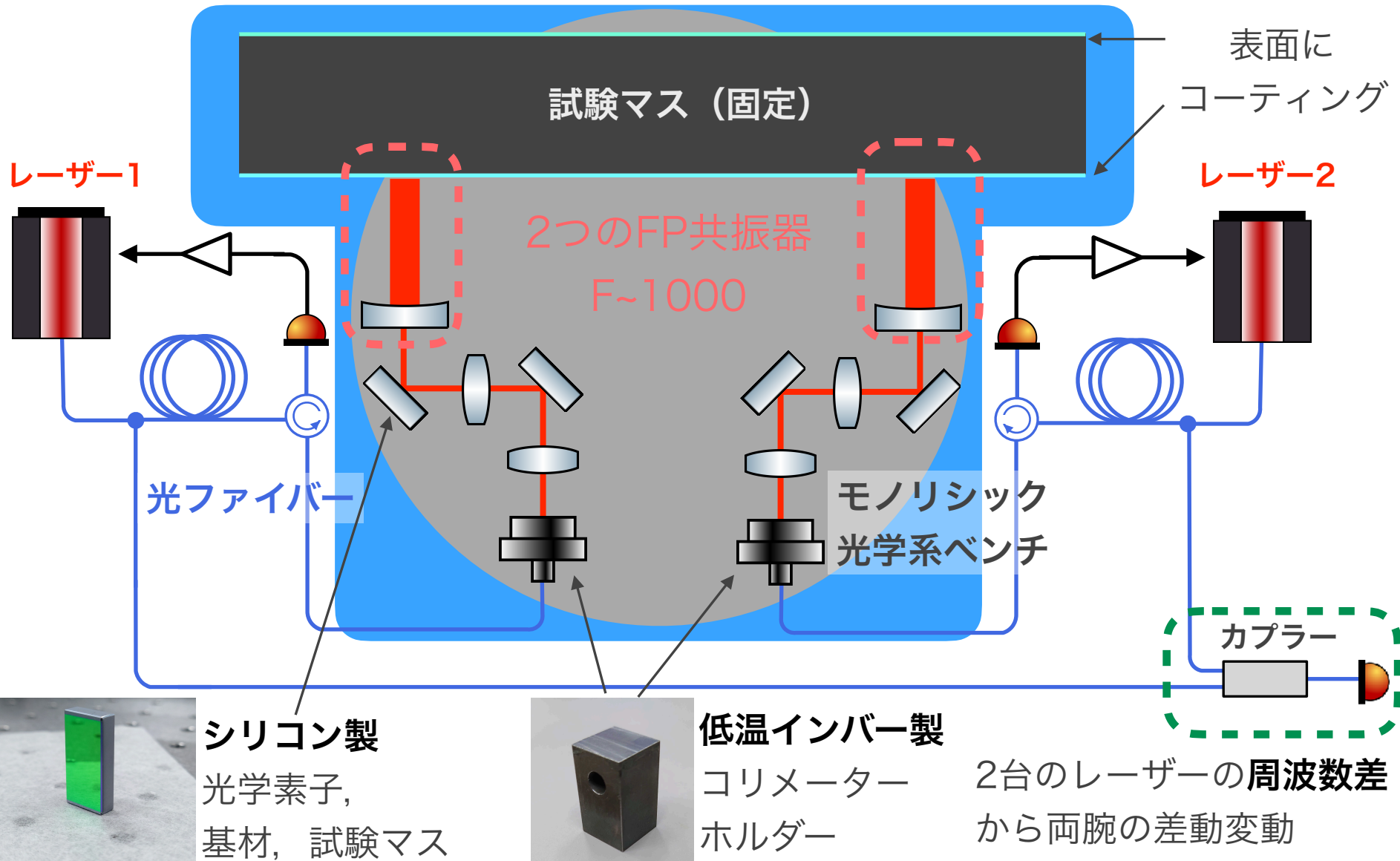
目的

- **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

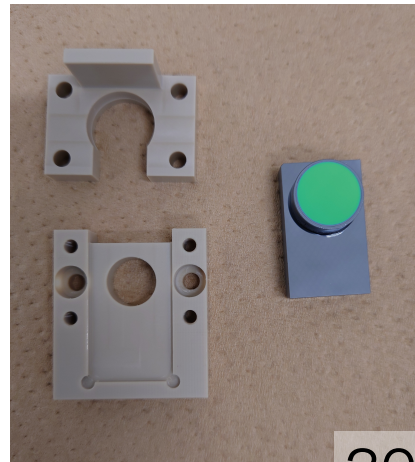
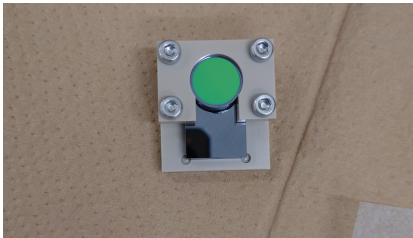
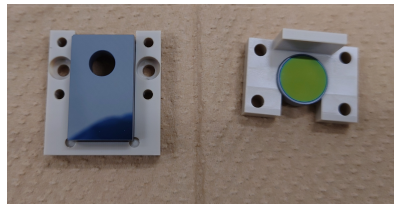


光学系デザイン



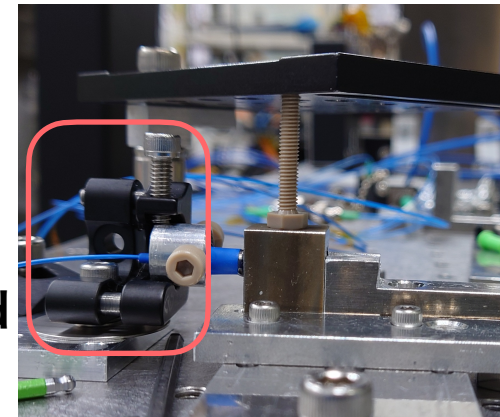
光学素子

- 円形素子（レンズ，入射鏡）
ジグを使ってホルダーに接着

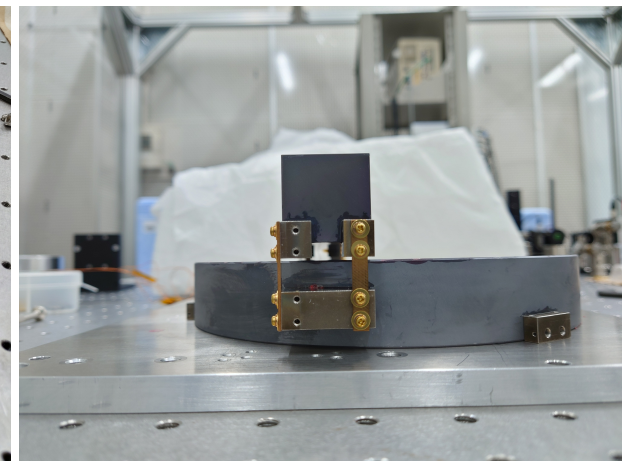
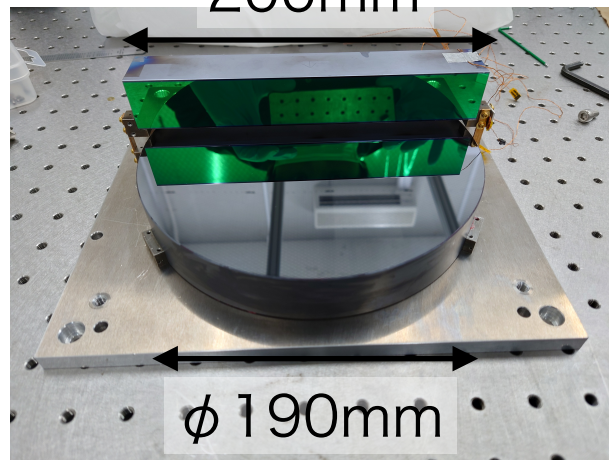


- コリメーター
偏光とアラインメントを確認して
ホルダーに接着

ミラーホルダー
を動かして調整
→ずれは $< 2 \text{ mrad}$



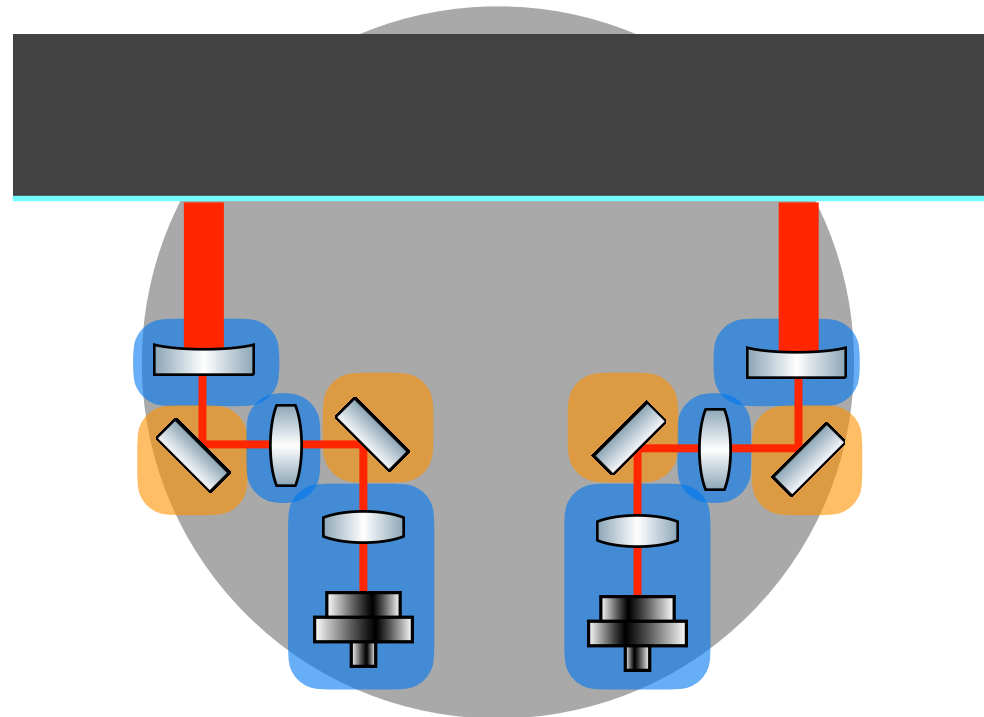
- 試験マス
板状のヒンジで
シリコン基板に固定



アラインメント手法

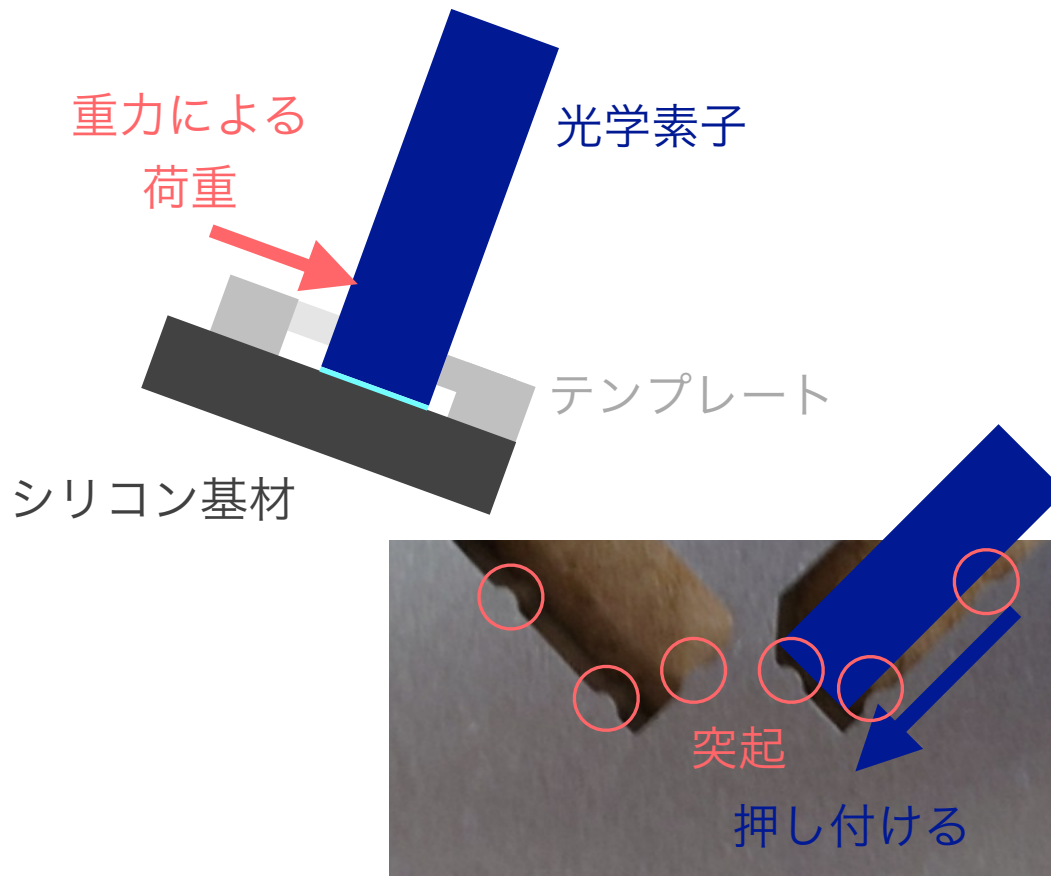
要求精度の異なる2パターンの光学系

- 取り回し, ピックオフ,
モードマッチング, 入射鏡
 - 精度低め (~ 1 mrad)
 - ▶ **テンプレート**を用いて
アラインメント
 - **ステアリング鏡**
 - 精度高め (~ 10 μ 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

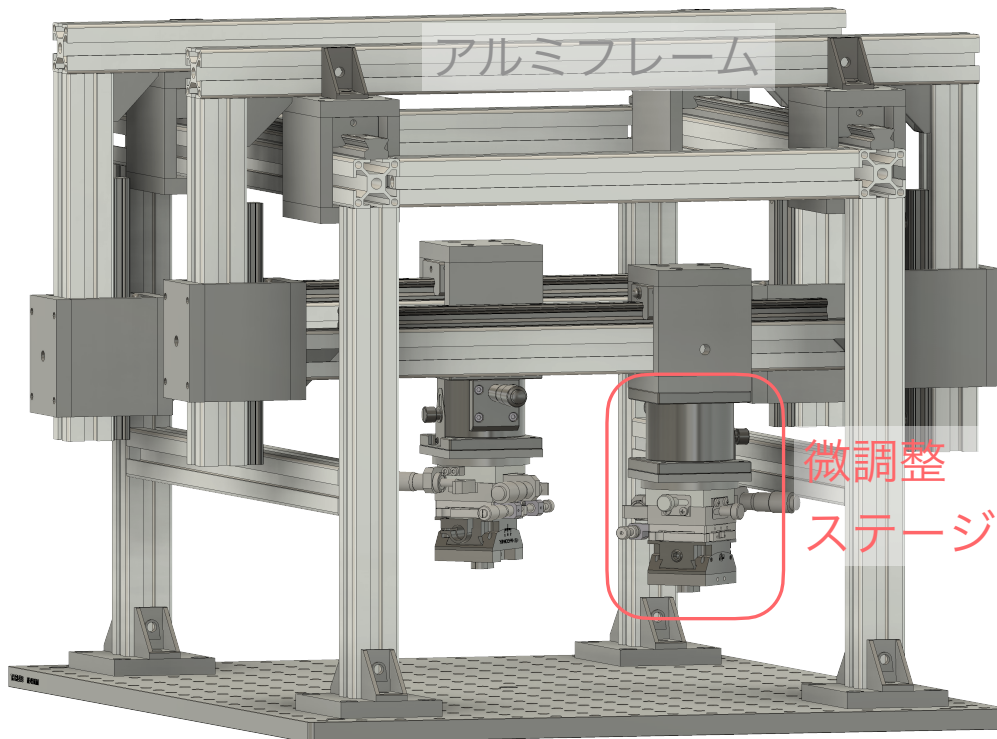
- 突起のついた板に，光学素子を押し付けるような形で固定
- 全体を傾けることで荷重をかける



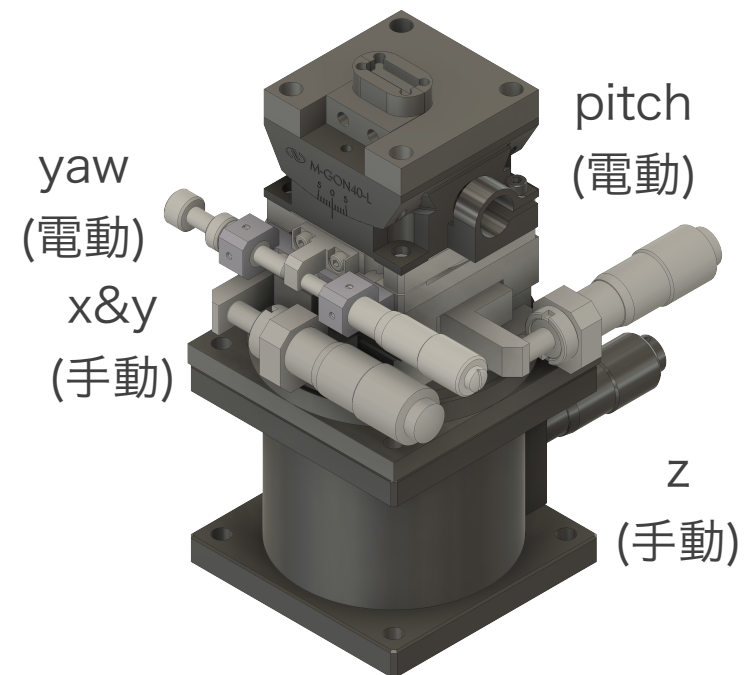
ステージを用いた微調整

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)

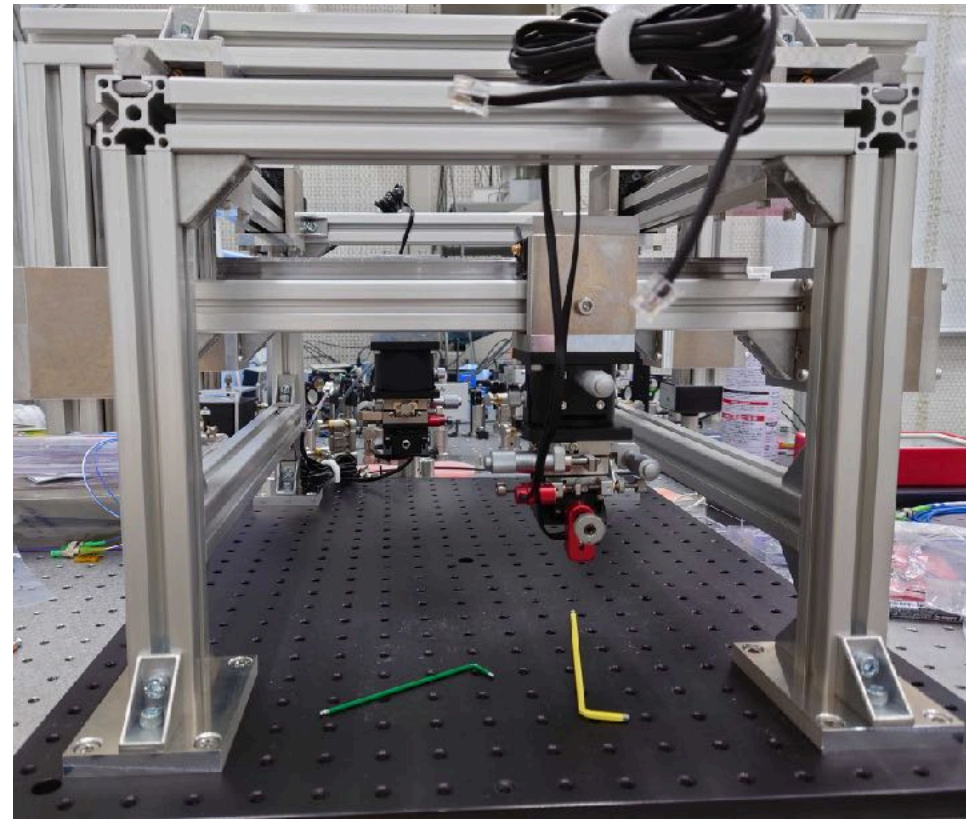
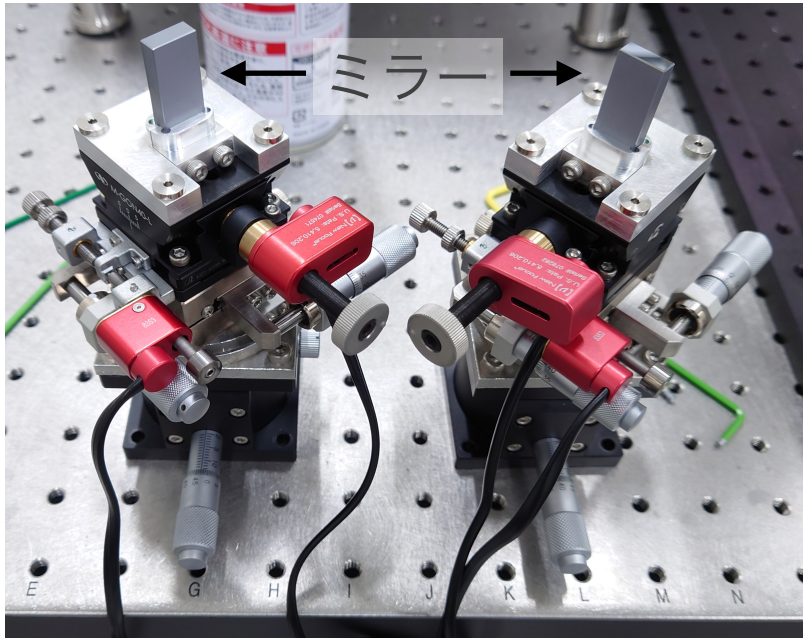


光学系ホルダー



微調整ステージ

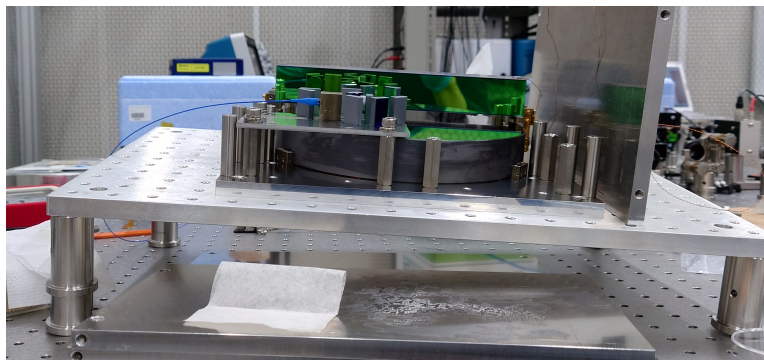
微調ステージ



ステージ全体

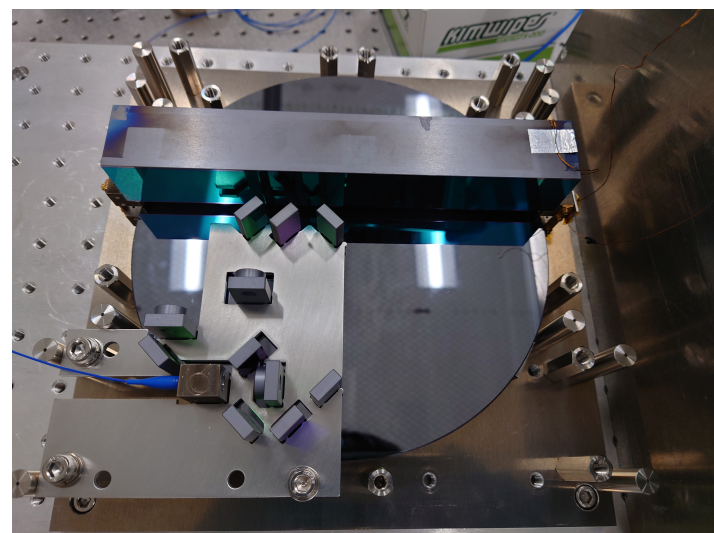
入射光学系の接着

入射光学系の一部をテンプレートで接着

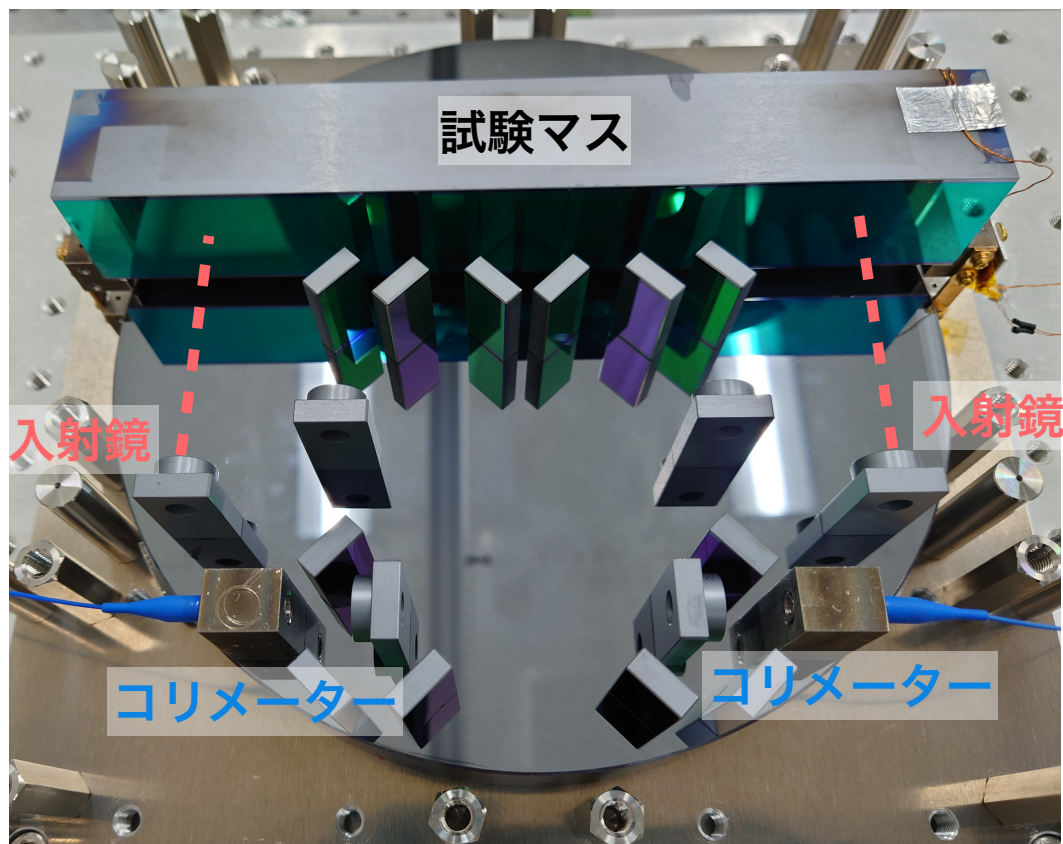


↑ 傾けて重力による荷重をかける

↓ テンプレートで位置決め

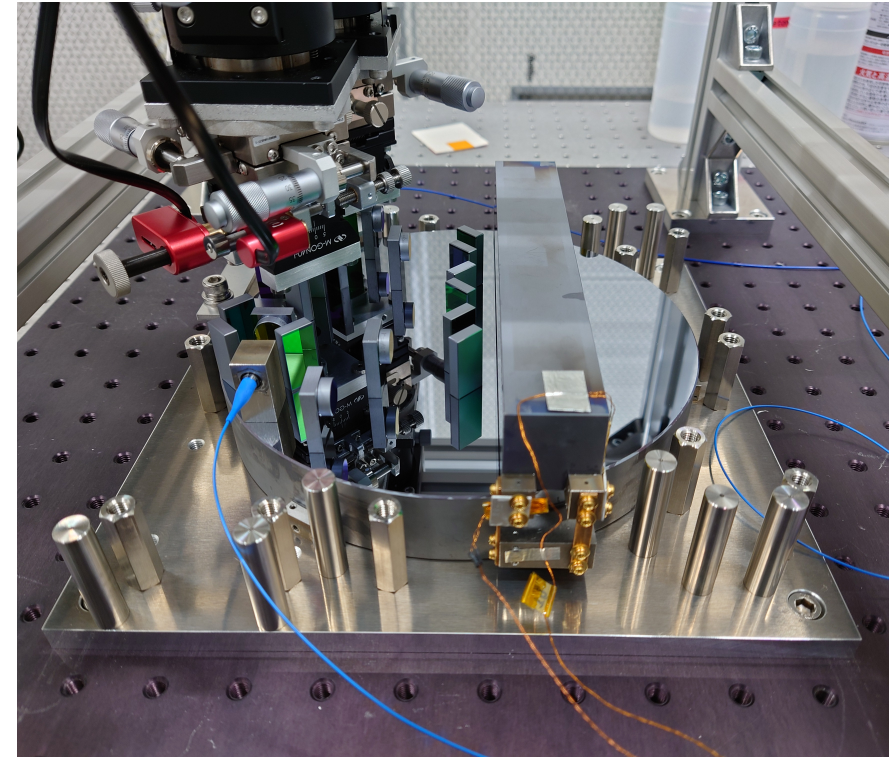
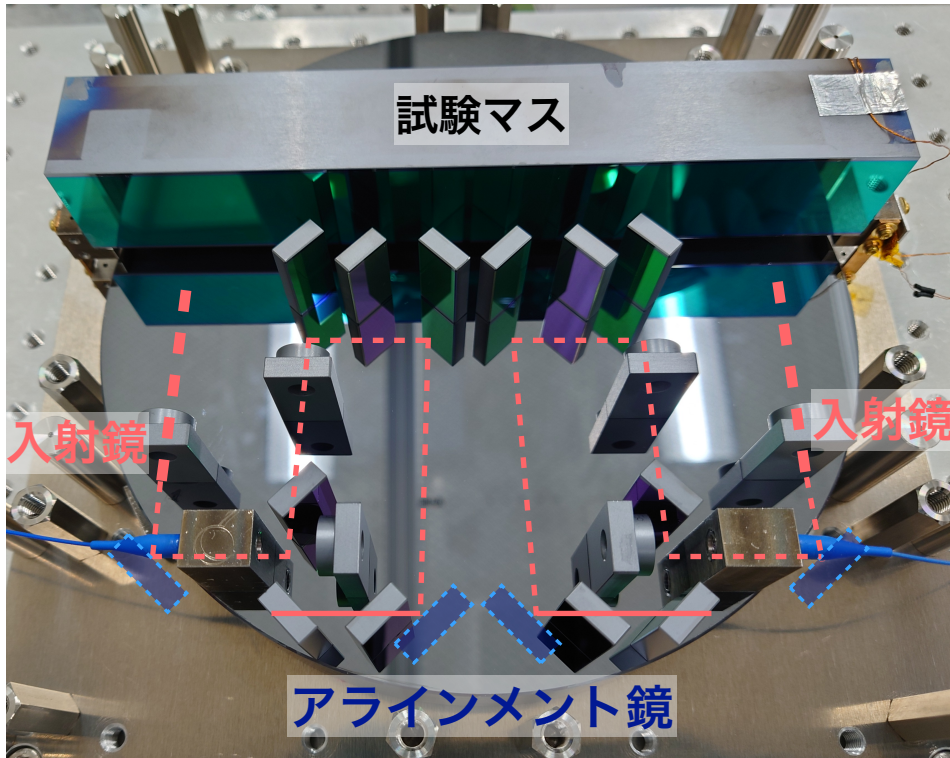


↓ 入射光学系を接着



入射光学系のアライメント

微調整ステージを用いて入射光のアライメントを合わせる



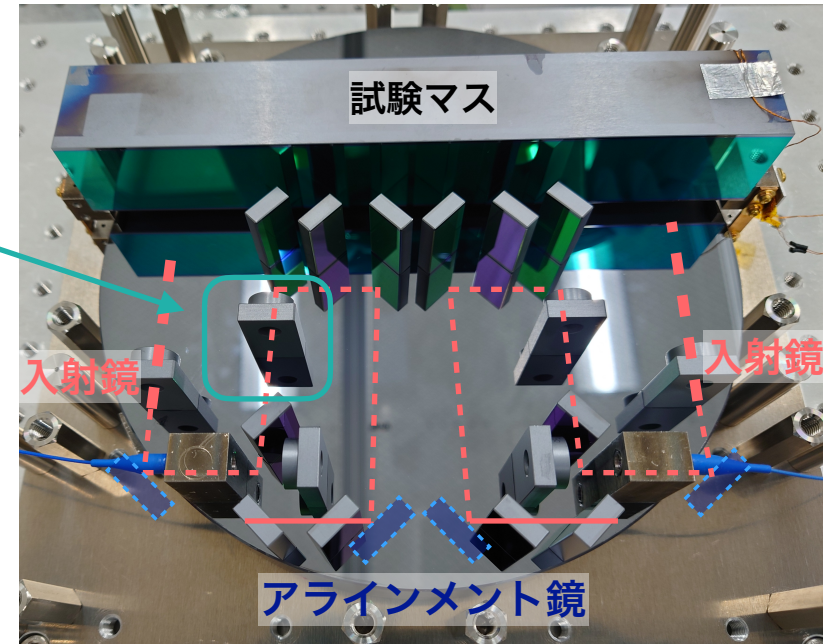
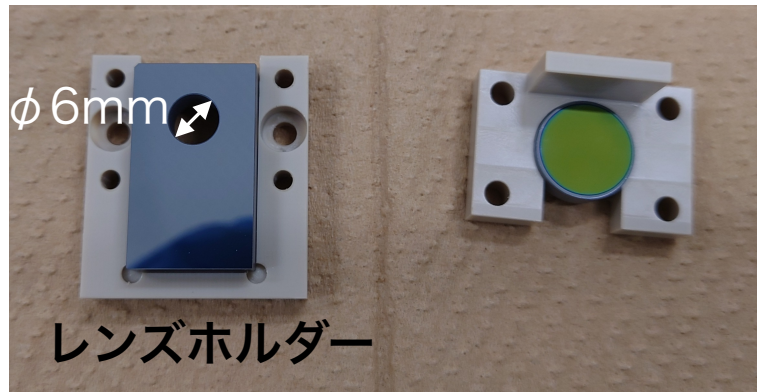
- ▶ 途中でビームがクリップして完全には合わせられていない
(モードマッチ率 60%程度が限界)

ビームのクリップ

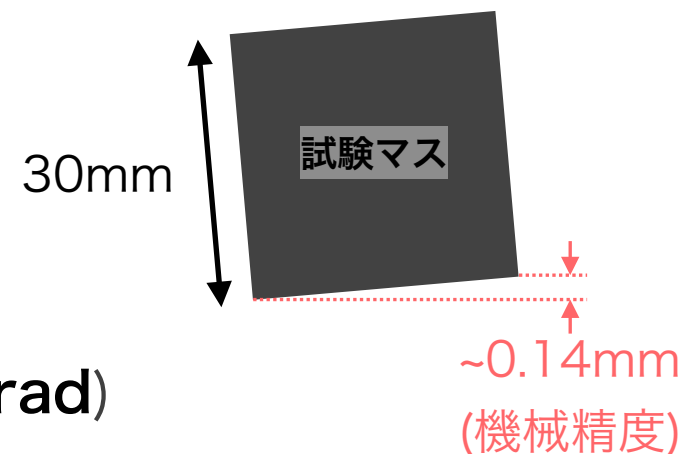
アラインメントを合わせようとする
とレンズホルダーでpitch方向にクリップ

ここでクリップ

- レンズホルダーの口径 6 mm
 - ▶ クリップしない範囲で調整できる入射光軸の角度は **4.5 mrad**



- 試験マスの固定の際のずれによってはこの範囲を越えうる ($0.14/30 \sim 4.7 \text{ mrad}$)



共振器のビーム光軸

裏側（試験マス側）から光を入射する

- ▶ 共振器軸をビームスポット高さから評価

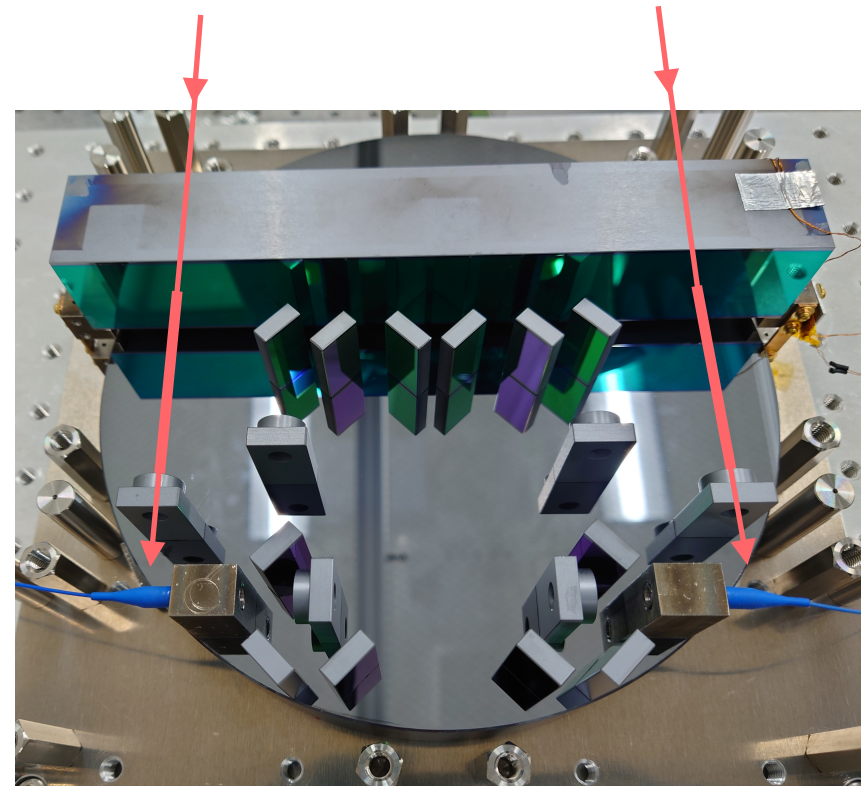
裏側のアライメントは完了

ビームの高さの測定

- ▶ 共振軸の傾き・並進
- ▶ ミラーの傾き

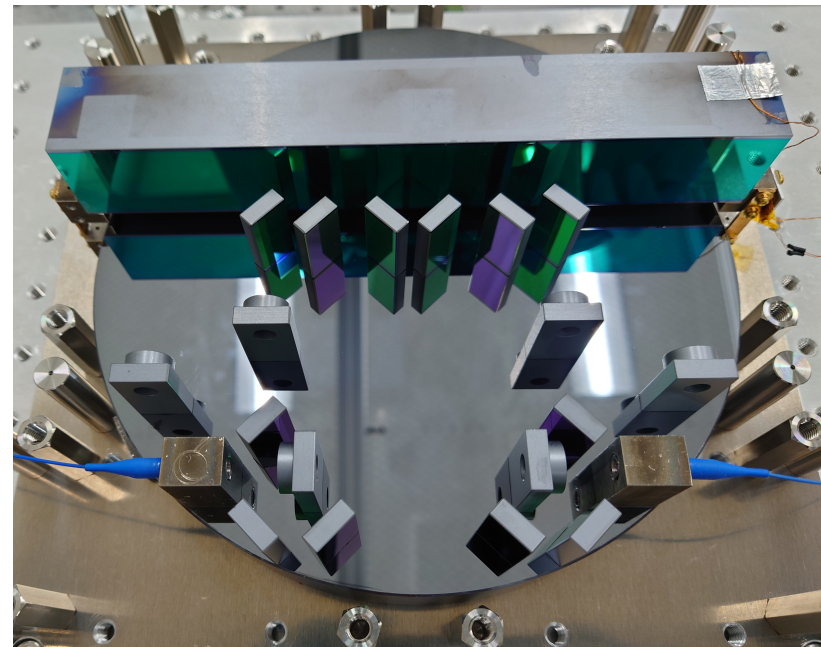
試験マスの姿勢を評価する

- ▶ ヒンジの取り付けで傾きを補正



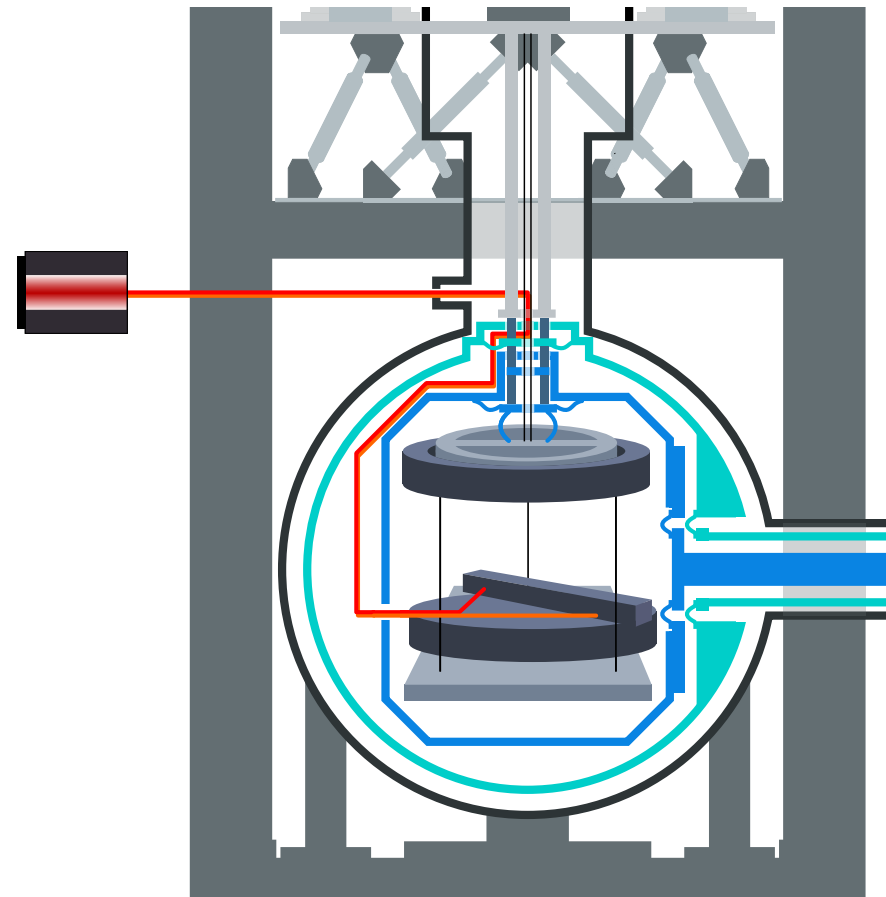
まとめ

- 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
- モノリシック光学系の構築
 - テンプレートを用いた位置決め
 - ステージを用いたアライメント
 - ▶ レンズホルダーの口径でクリップ



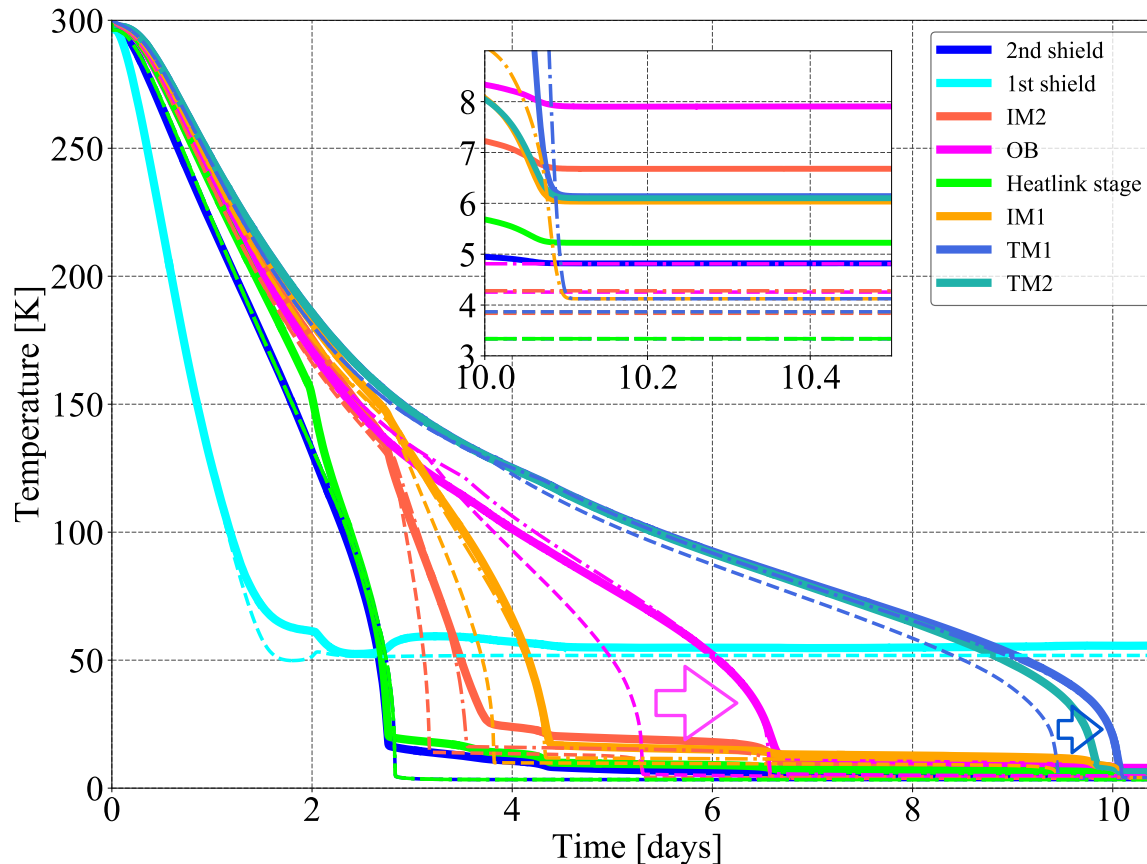
今後の展望

- アラインメントの改善
 - 裏側から光を入射して共振器軸の確認
 - 試験マスの姿勢の調整
- 残りの光学系の接着
 - 入射光モニター (PD・QPD)
 - 透過光モニター (PD・QPD)
- 低温試験
 - 真空槽にインストール
 - 4 Kに冷却
 - 感度 10^{-16} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す

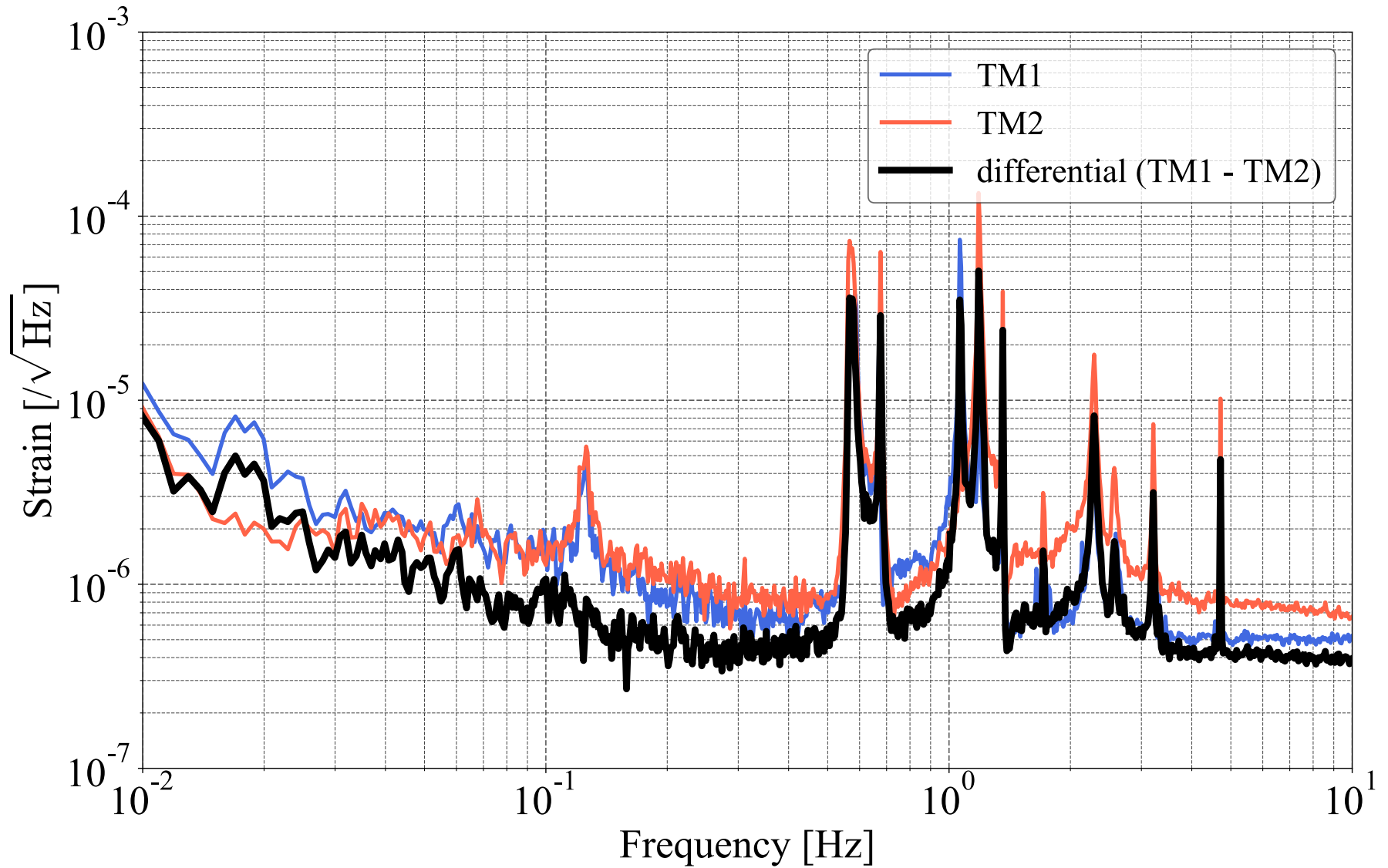


冷却結果

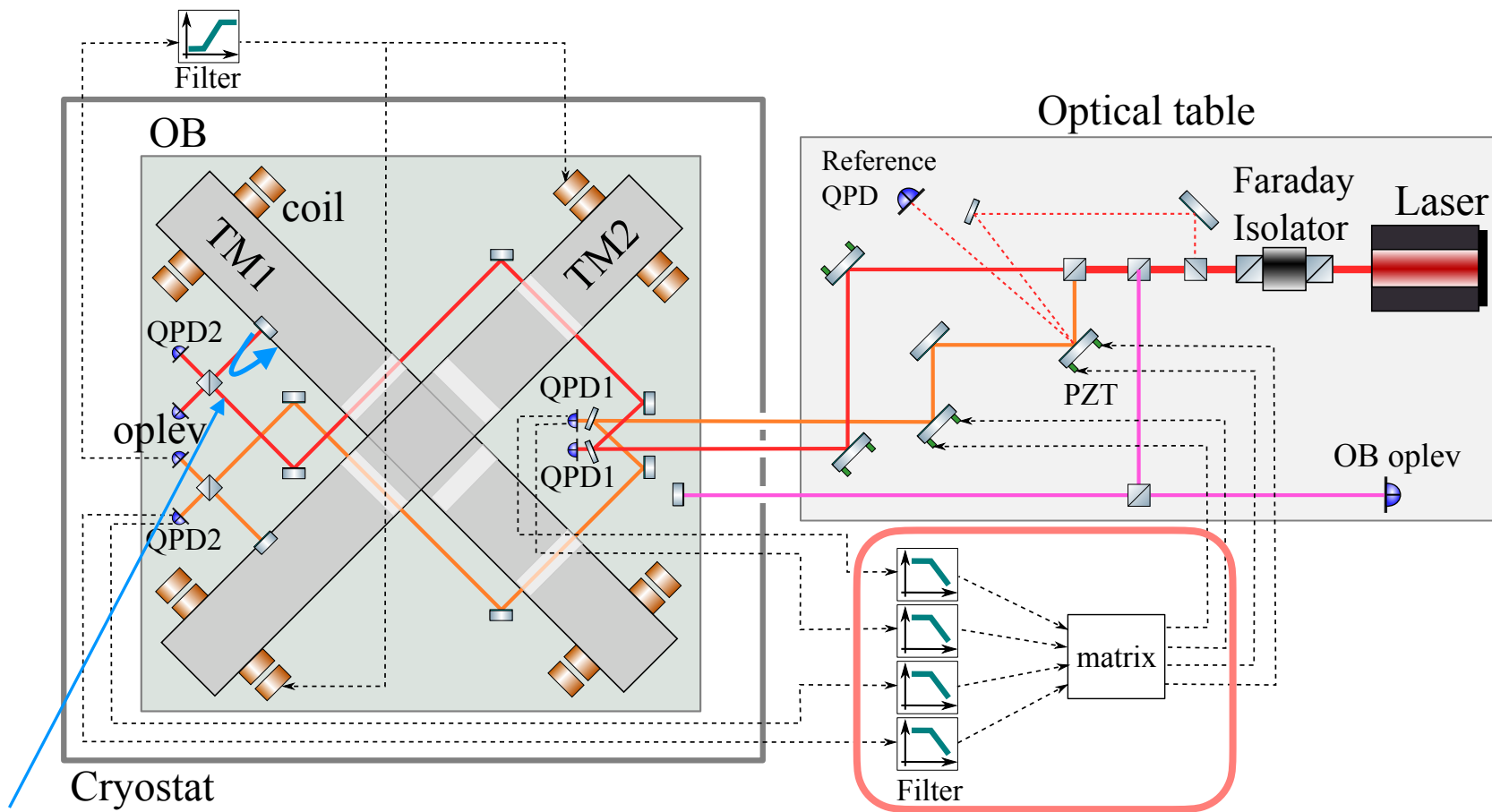
- 6.1 Kまでの冷却に成功 (4 Kの場合より1.2倍の熱雑音)
- 理論よりも冷却速度が遅い
- ▶ ヒートリンクの熱接触が想定よりも悪い



現在の感度



ビームジッター，迷光



迷光雑音：

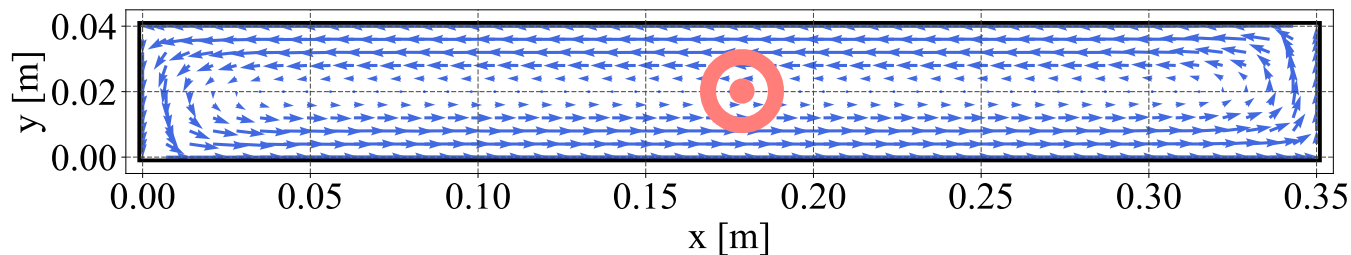
BSの表面反射などによる迷光が計測信号と干渉し，強度変動を起こす雑音

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

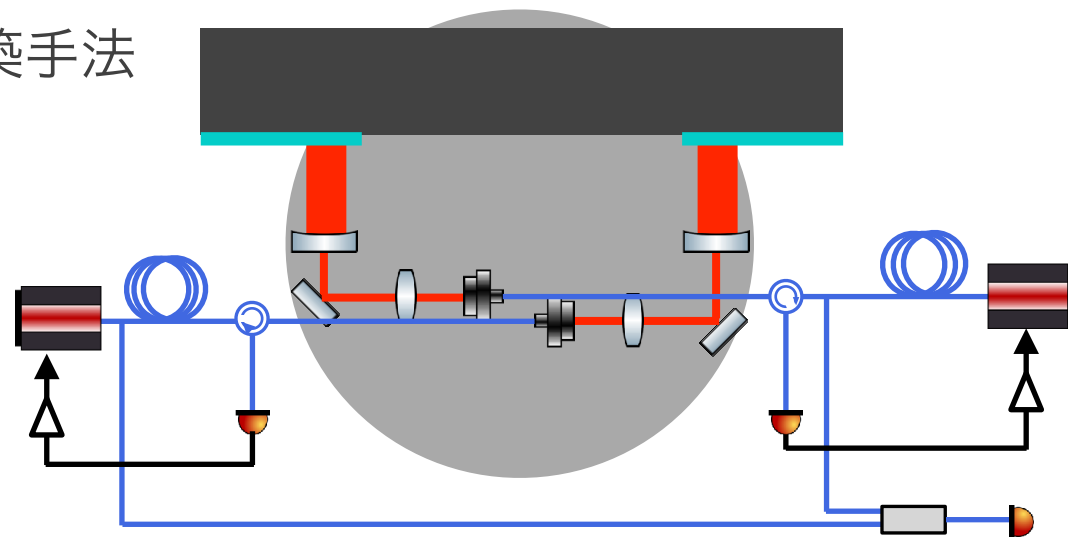
- 環境磁場変動による誘導電流が試験マスに流れ、磁気モーメント μ をもつ
- 環境磁場のDC成分 B とカップルし、トルク雑音 $N=B \times \mu$ が生じる



- μ 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

開発項目

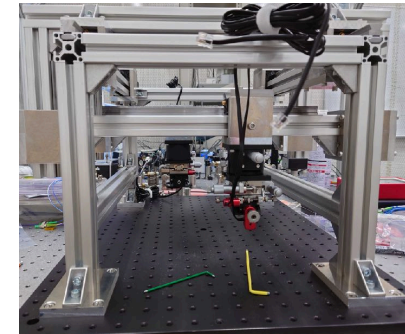
- モノリシック光学系の構築手法
 - 接着方法
 - アライメント方法
- 低温における動作
 - コリメーター
 - アライメントずれ
 - PDの動作（透過光，強度モニター用，etc.）
- 光学系の雑音レベルの測定
 - 測定系（レーザー，電気回路，…）



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

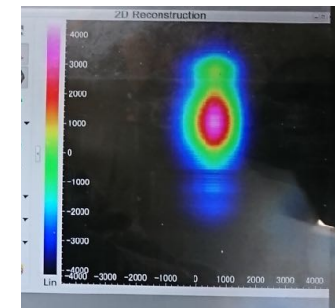
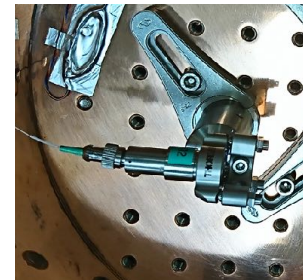
開発項目

- 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



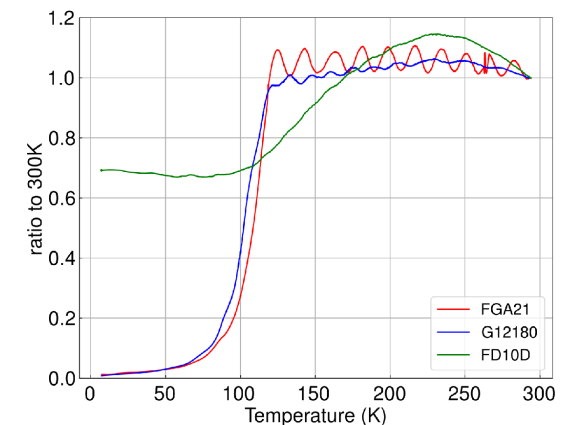
- PDの動作 (透過光, 強度モニター用, etc.) → 動作確認

- 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



低温試験

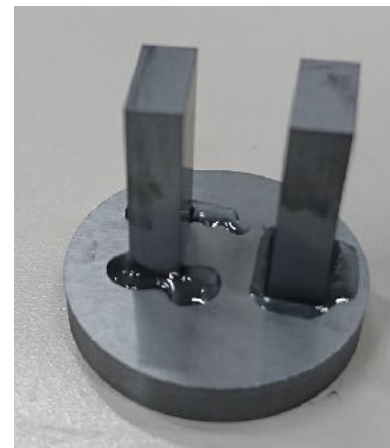
シリコン同士を

- Stycast 1266
- DP190

エポキシ

- NOA63
- NOA81

紫外線硬化樹脂



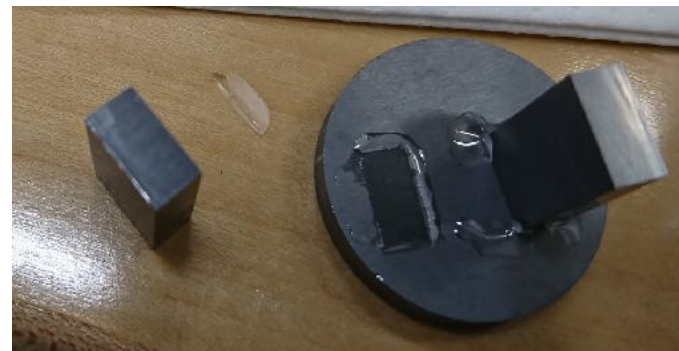
冷却&
昇温後



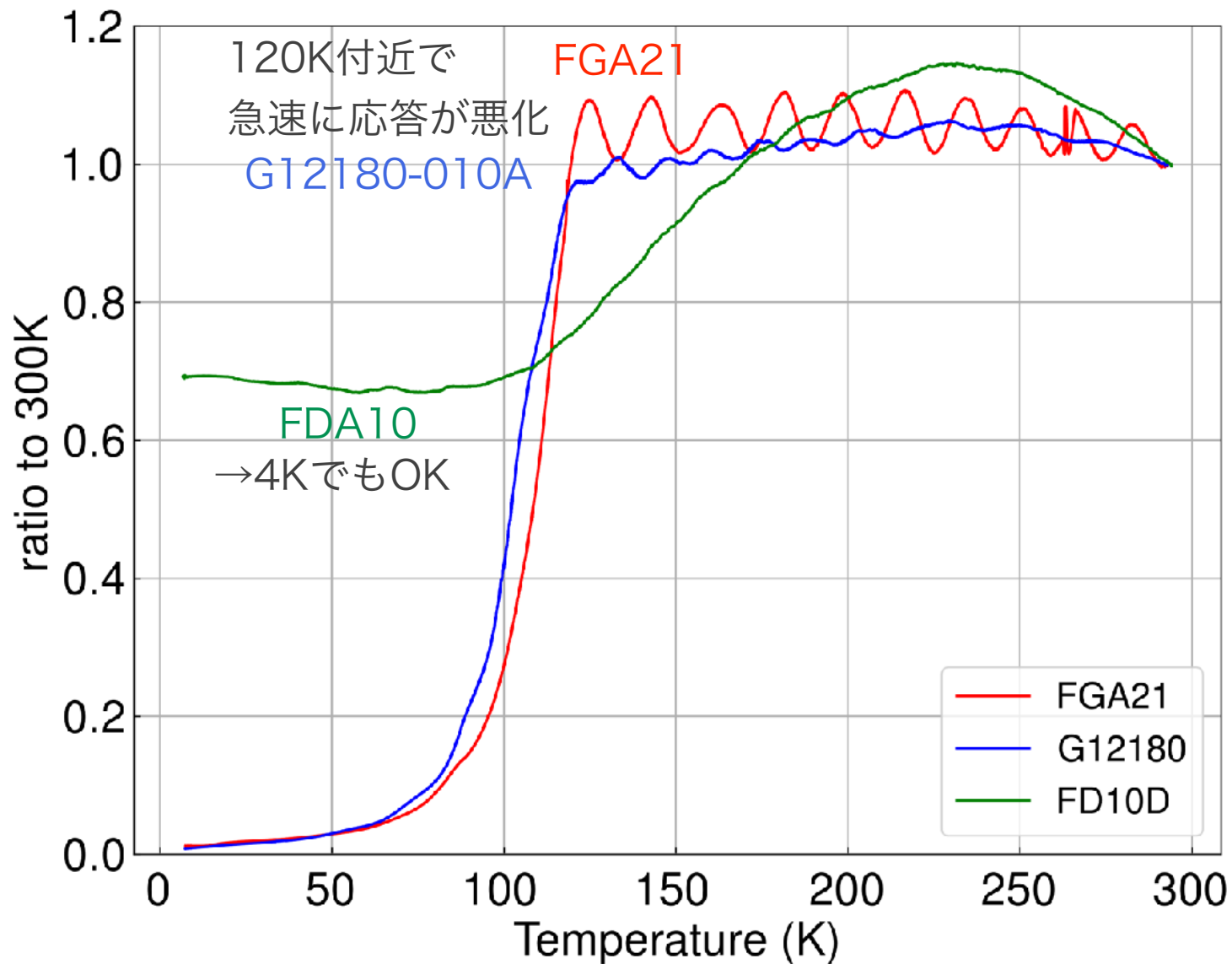
で接着し，4Kまで冷却

- ▶ 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



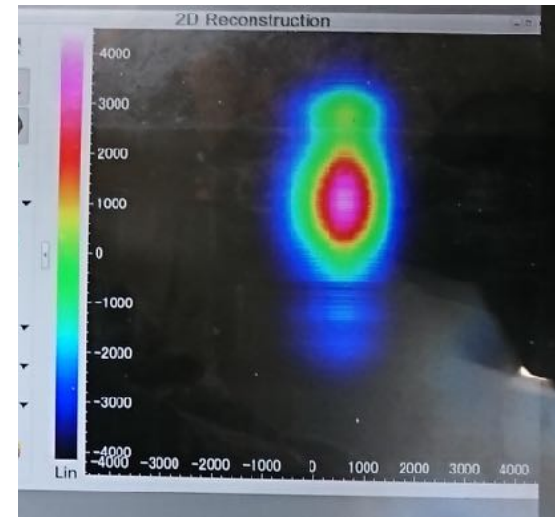
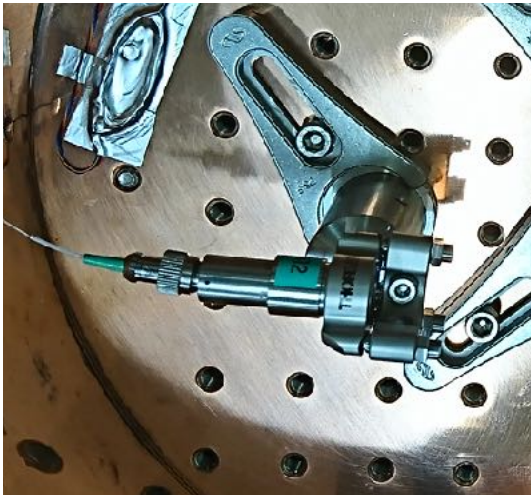
フォトダイオード



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



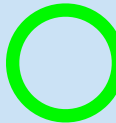














- 他の種類のコリメーターでも同様の現象
 - ▶ 低温化でレンズの位置が変化した可能性

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

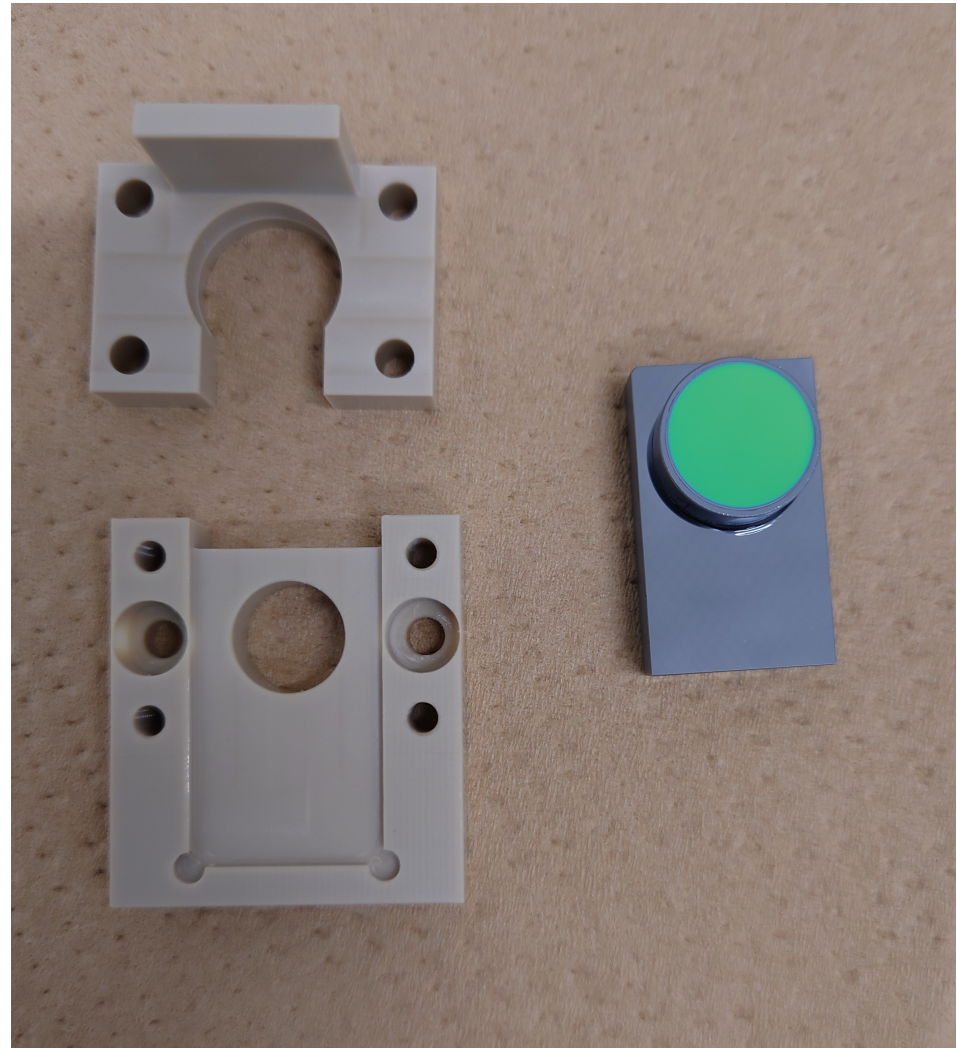
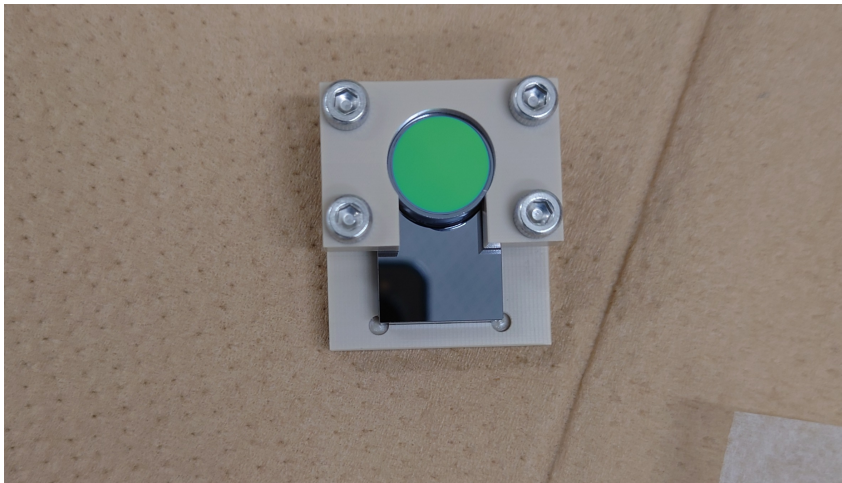
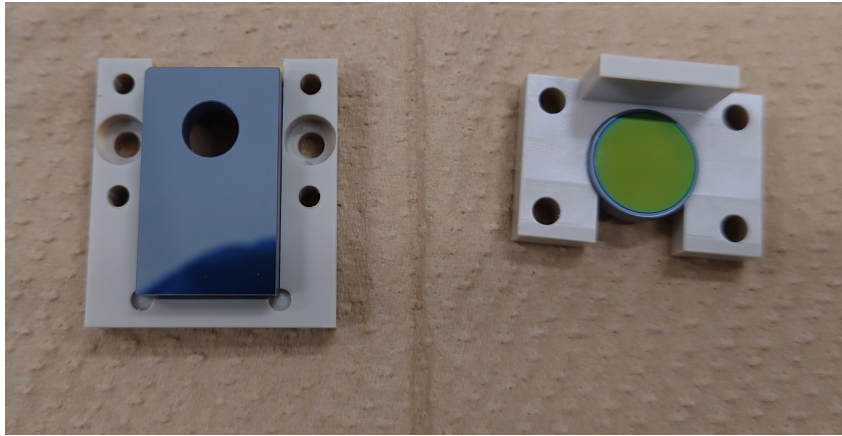
干渉計構成

	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

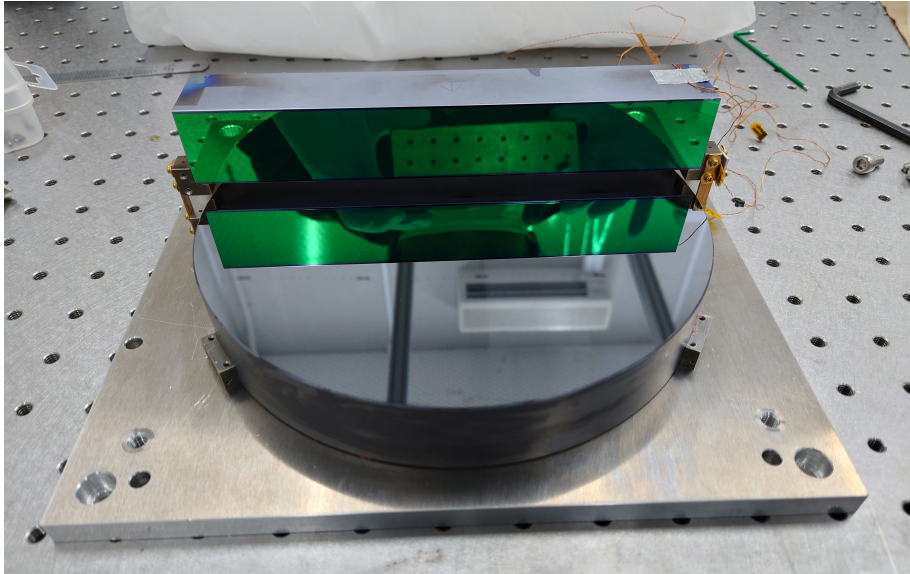
Extra Photos

- Lens & cavity mirror bonding

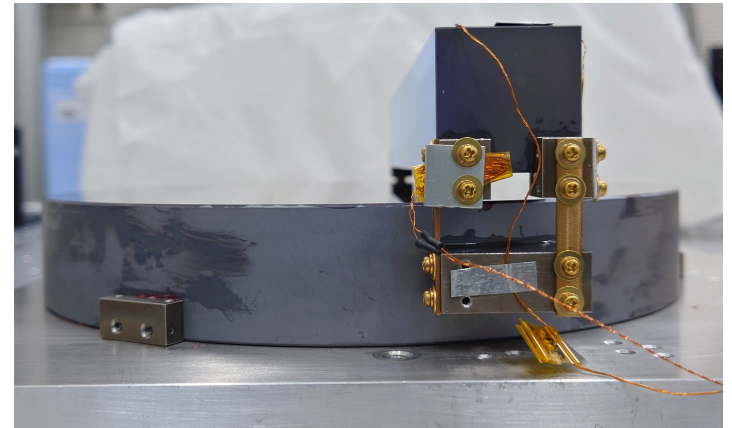
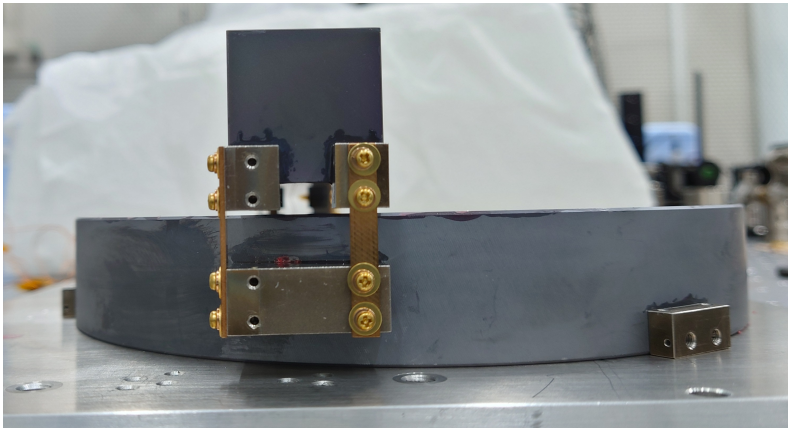
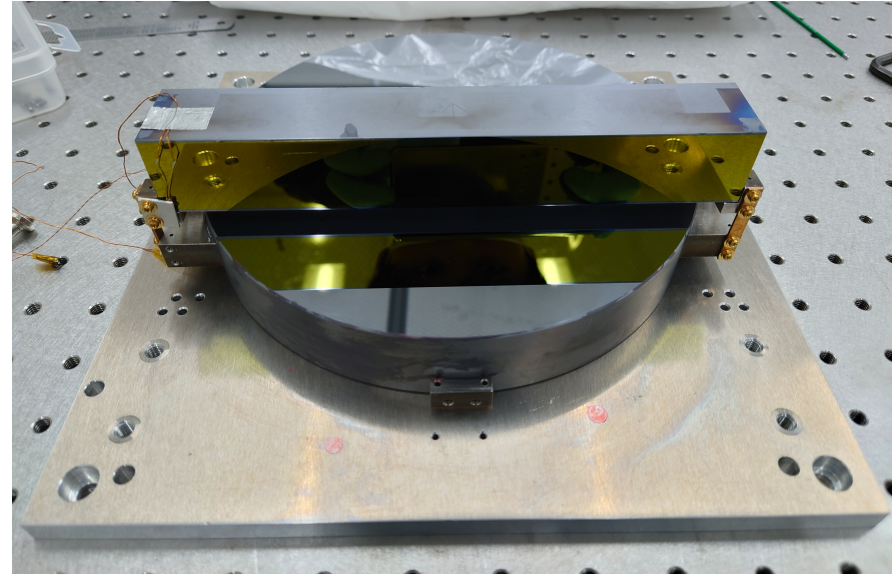


TM Support

HR side

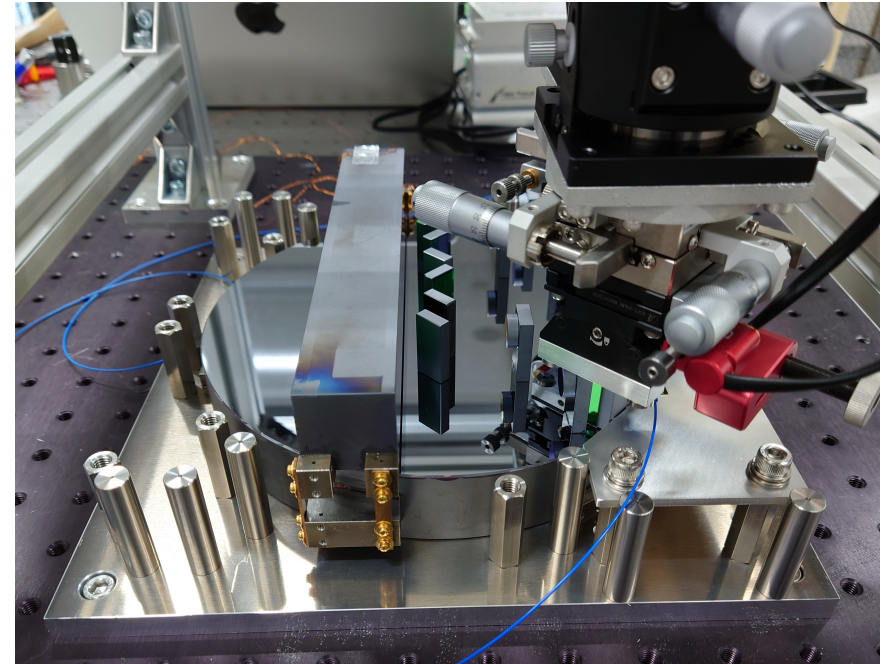
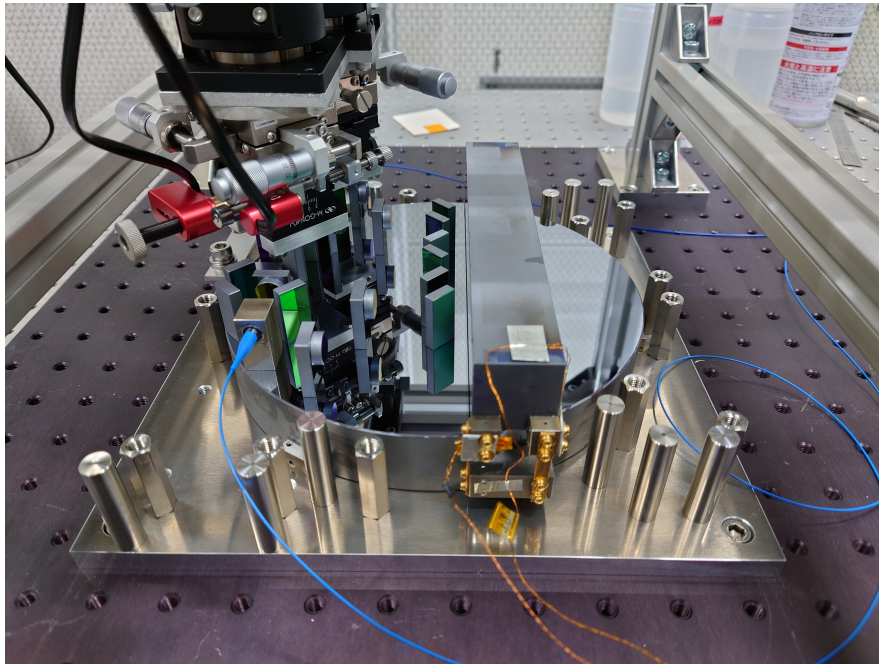


AR side



入射光学系のアライメント

微調整ステージを用いて入射光のアライメントを合わせる



- ▶ 途中でビームがクリップして完全には合わせられていない
(モードマッチ率 60%程度が限界)
- ▶ 試験マスの姿勢調整が必要

Collimator Bonding

