

ねじれ振り子型重力波望遠鏡

TOBAの開発(42):

低温モノリシック干渉計の観測

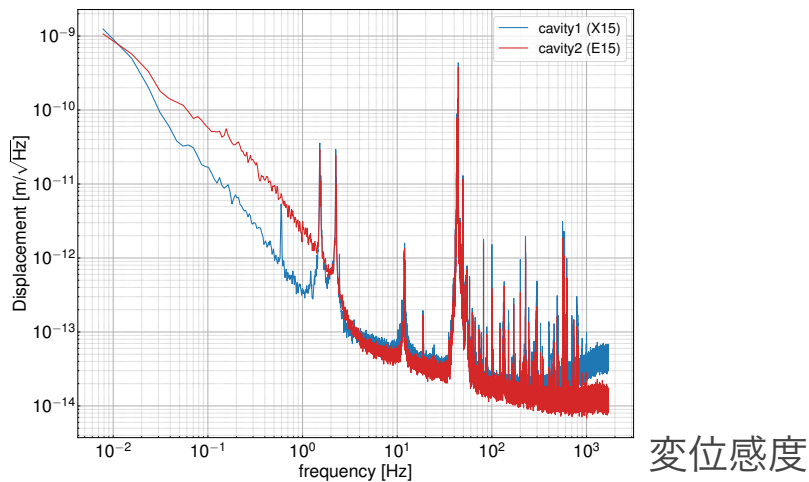
高野 哲, 大島 由佳, Ooi Ching Pin, Cao Mengdi^A,

Perry Forsyth, 道村 唯太^{B,C}, 小森健太郎^C, 安東 正樹

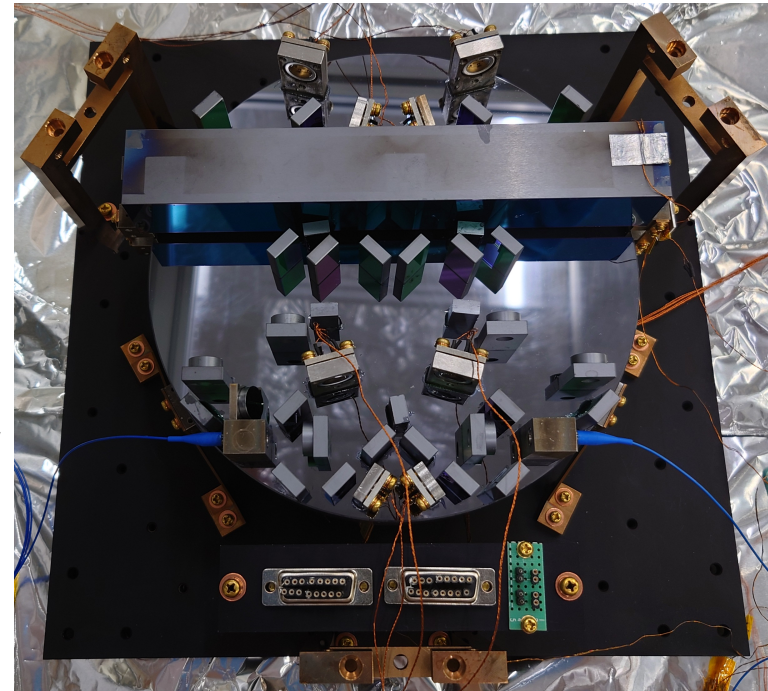
東大理, 北京師範大天文^A, カリフォルニア工科大学^B, 東大ビッグバン^C

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完了
 - 共振器の変位雑音を測定



モノリシック
光学系



Contents

- TOBAについて
- モノリシック光学系の構築
- 測定結果
- まとめ, 今後の展望

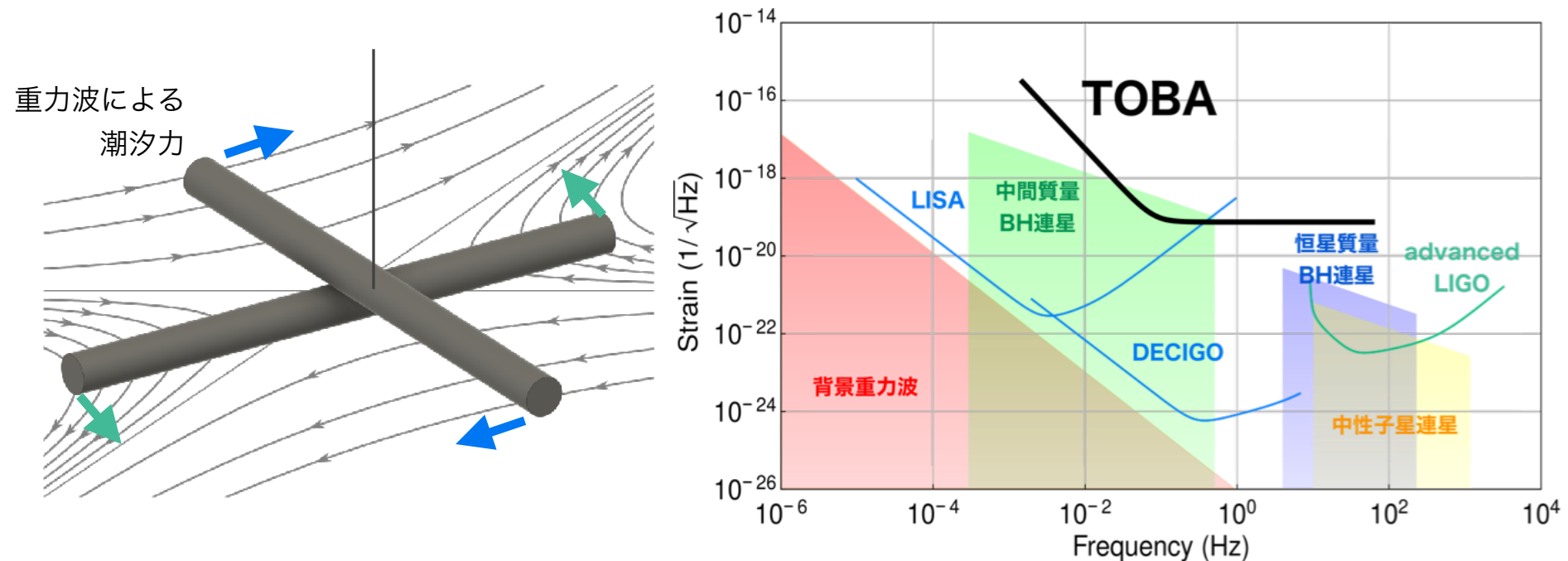
Contents

- **TOBAについて**
- モノリシック光学系の構築
- 測定結果
- まとめ, 今後の展望

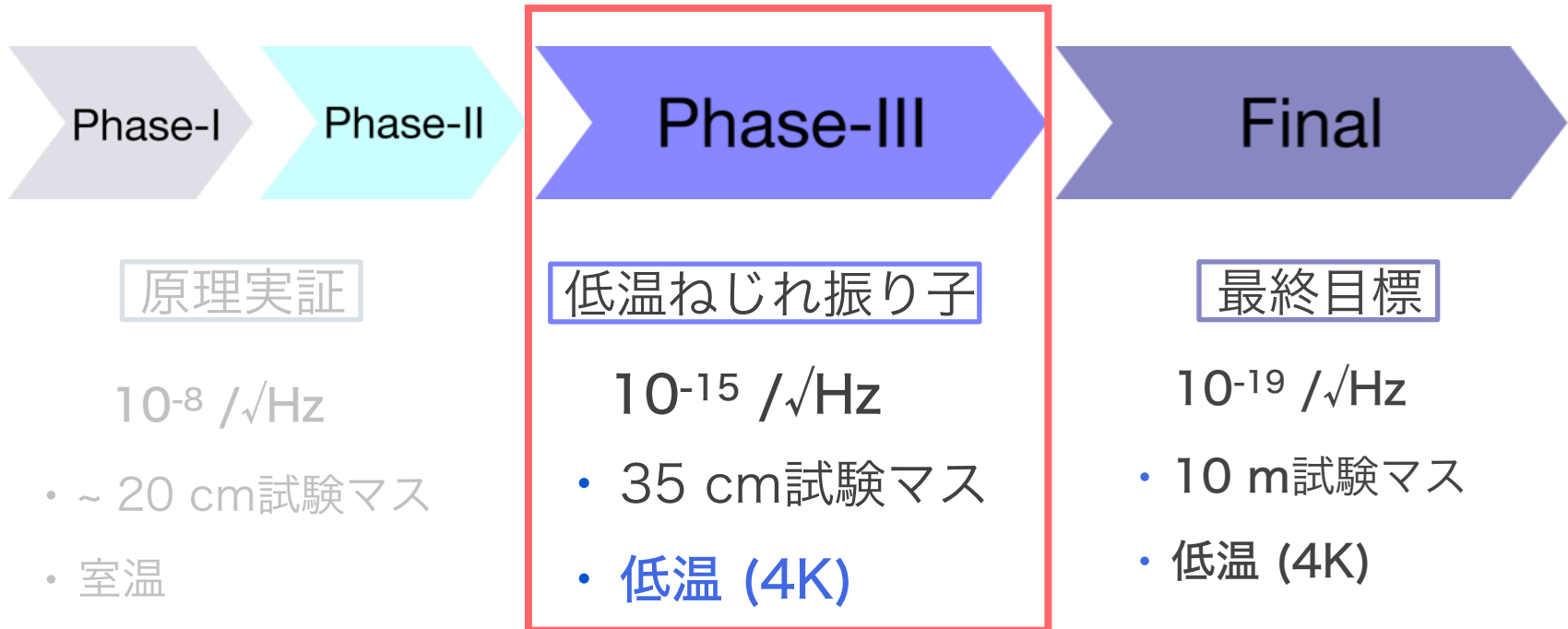
ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA

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

TOBAの変位読み取り雑音

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 共振器
 - 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

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

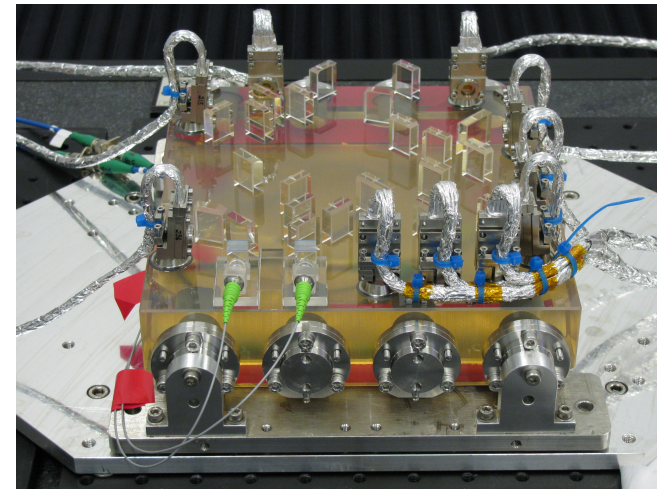
$3.5 \times 10^{-14} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz を達成

低温下でのモノリシック光学系の実現

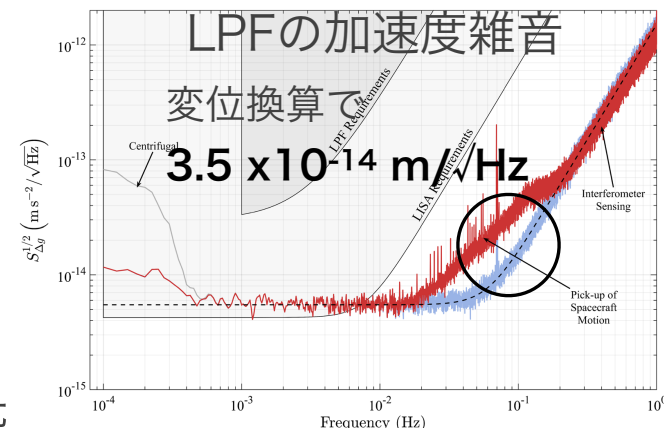
- 熔融石英は低温での性質が悪い
(Q値, 熱膨張率)

▶ **シリコン基材 + シリコン光学素子**で構築

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

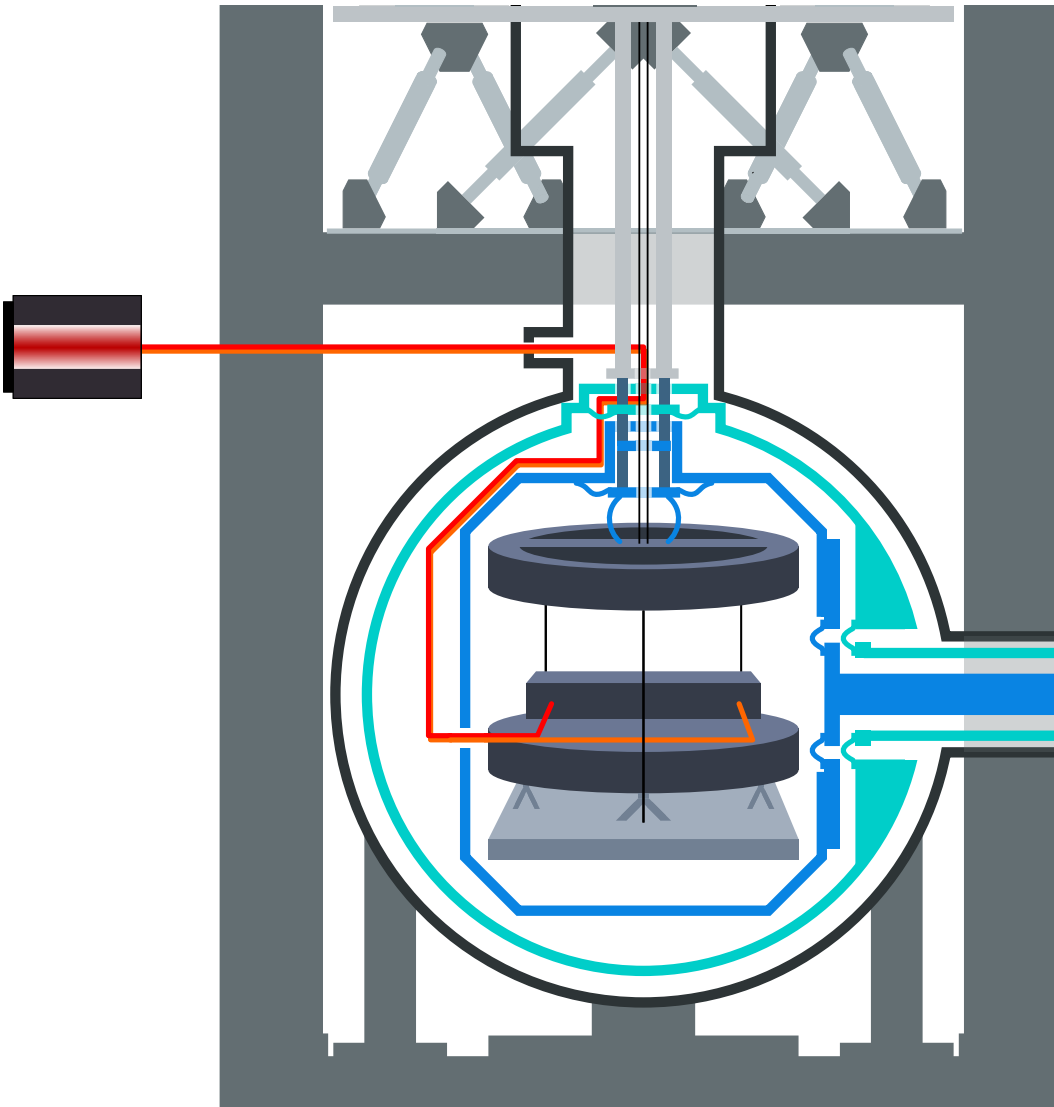


[LISA Mission Proposal](#)



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

実験系セットアップ



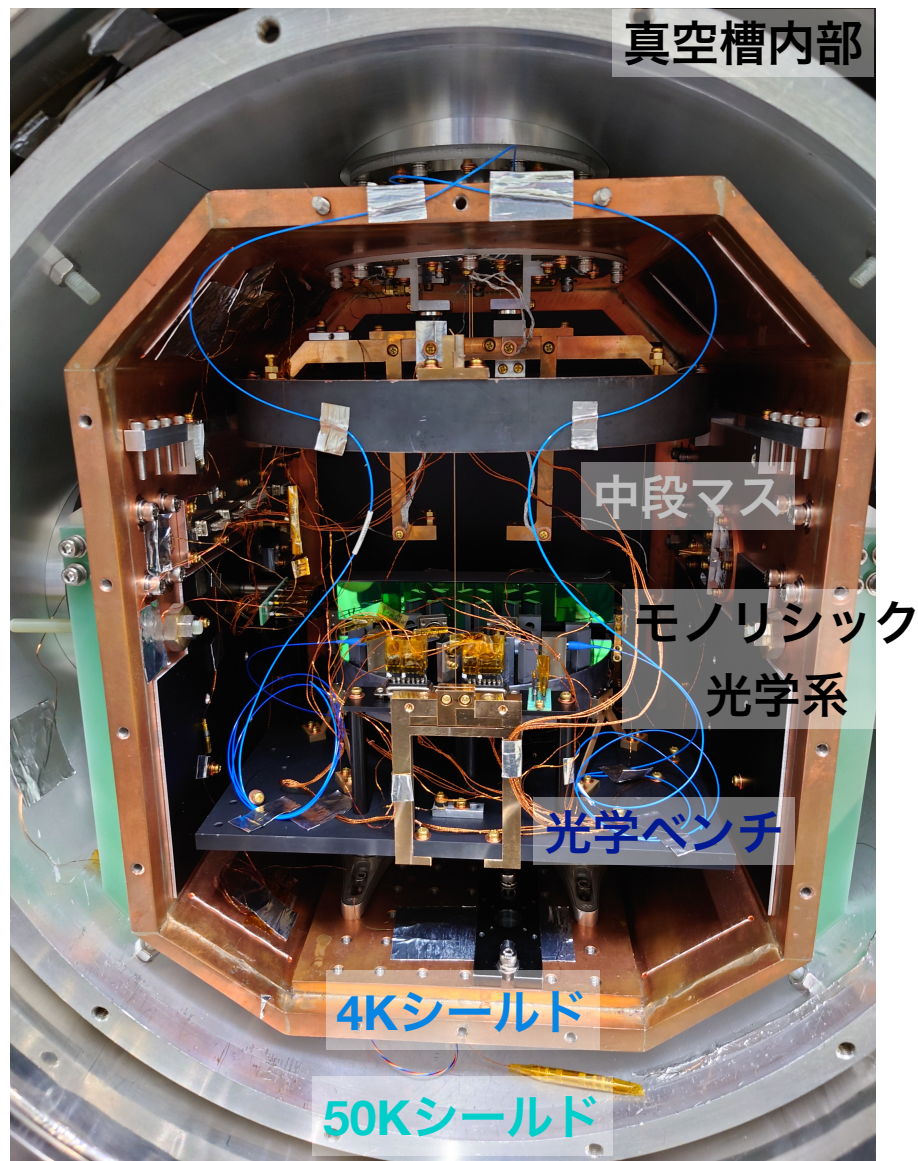
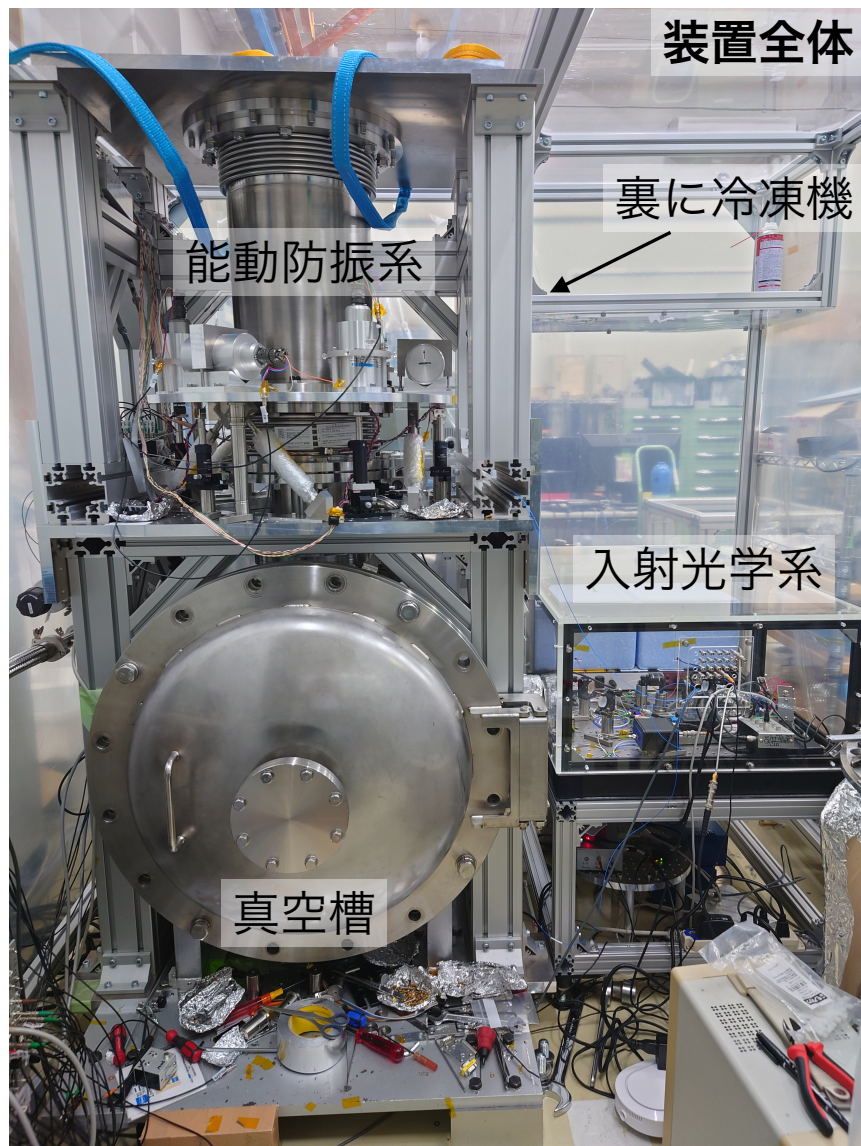
構成の簡略化

- 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

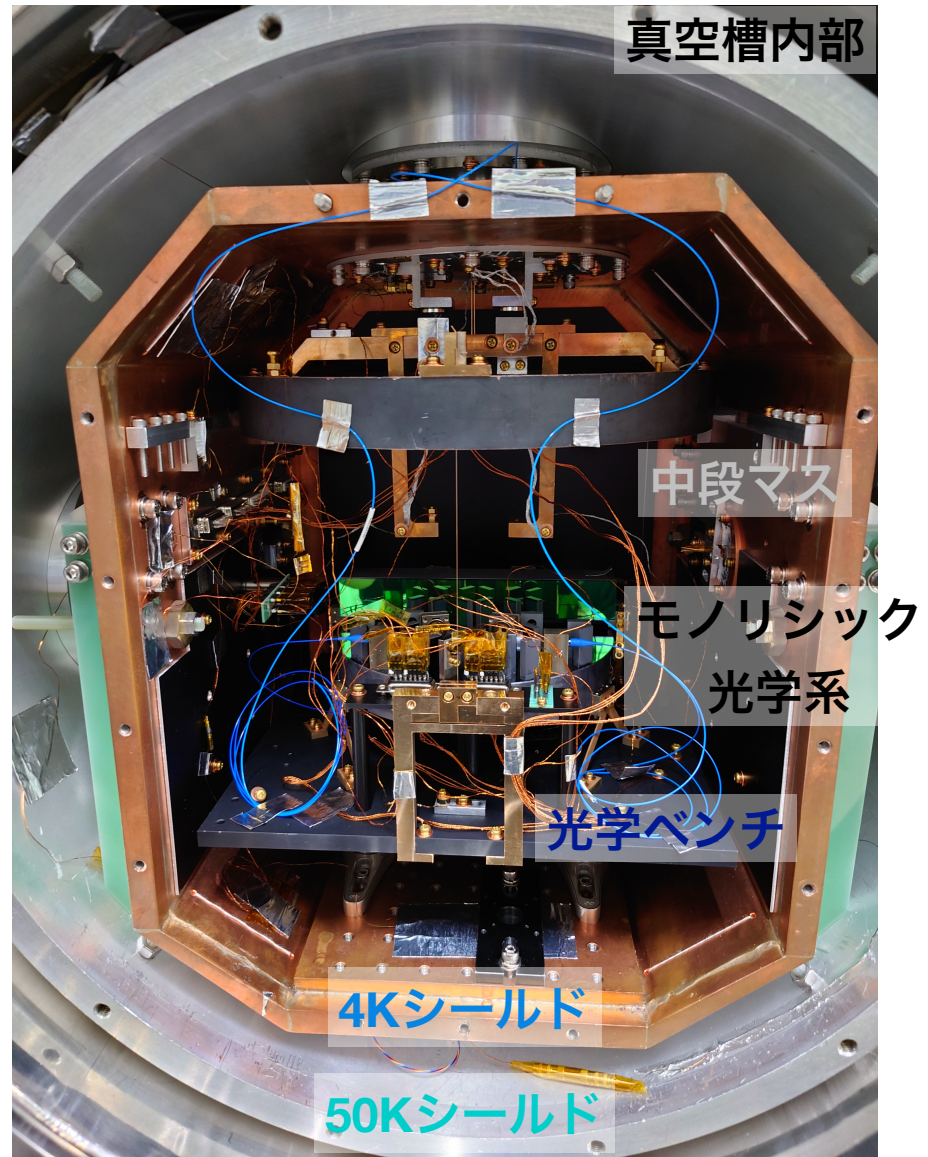
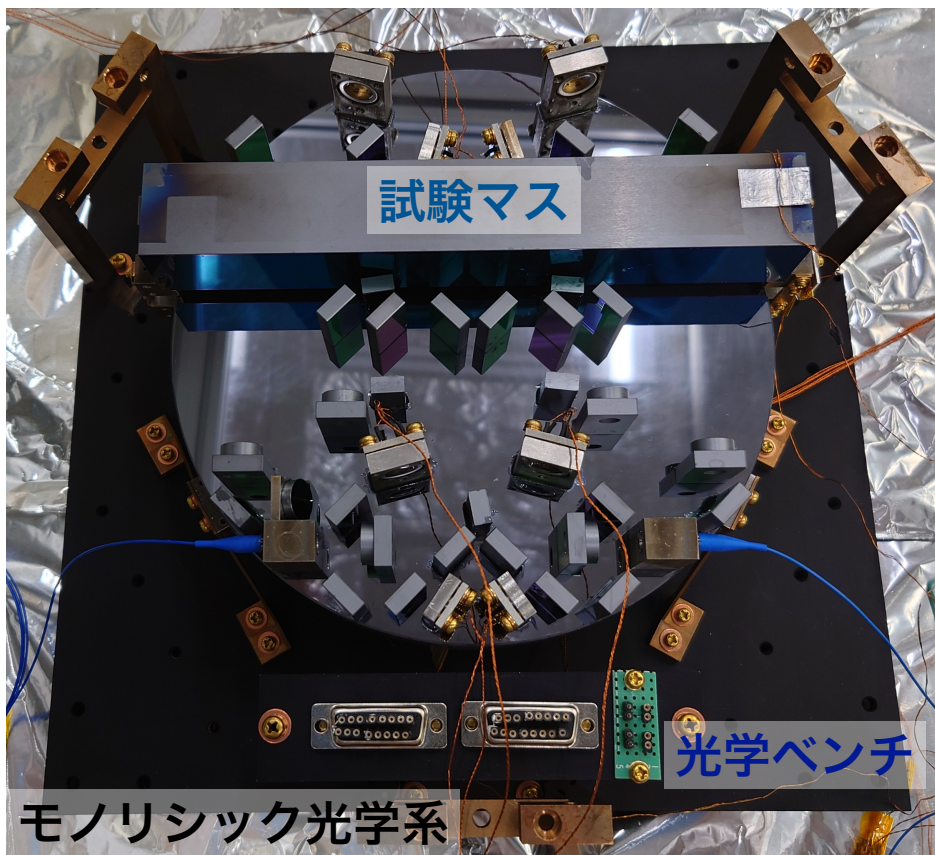
目的

- **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

装置写真



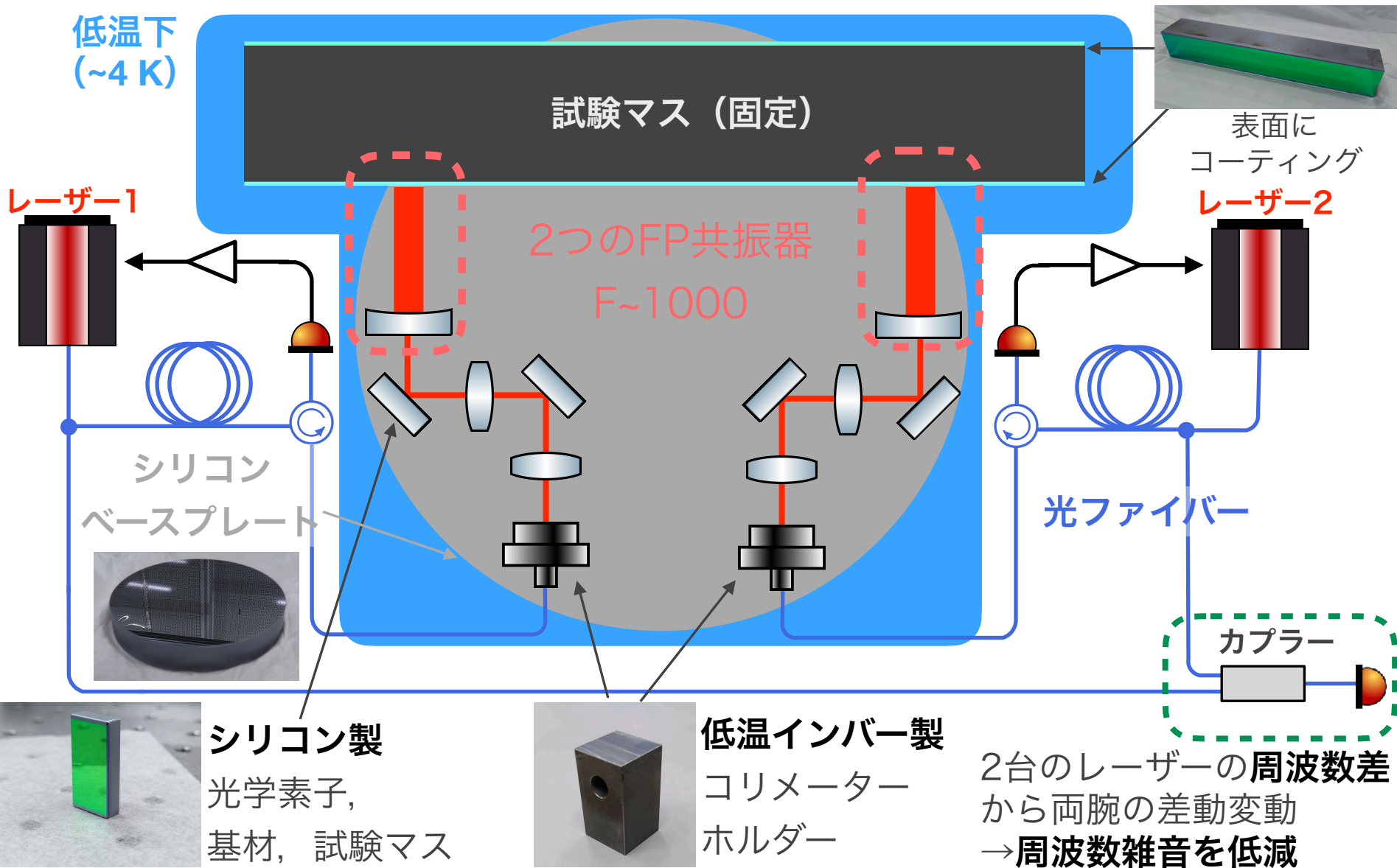
装置写真



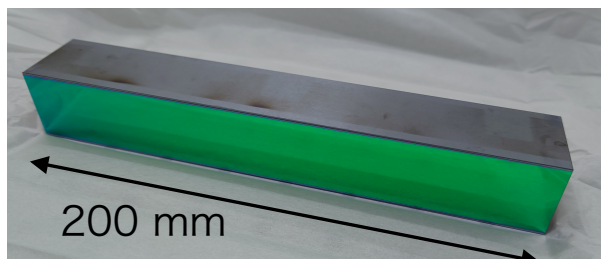
Contents

- TOBAについて
- **モノリシック光学系の構築**
- 測定結果
- まとめ, 今後の展望

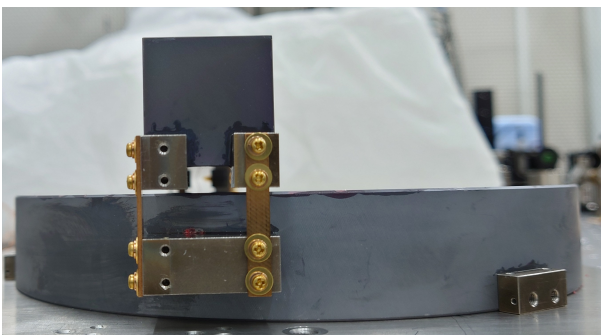
モノリシック光学系光学系デザイン



モノリシック光学系の構築



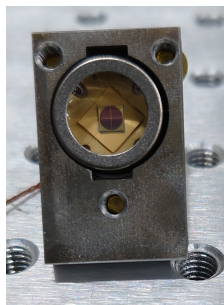
試験マス



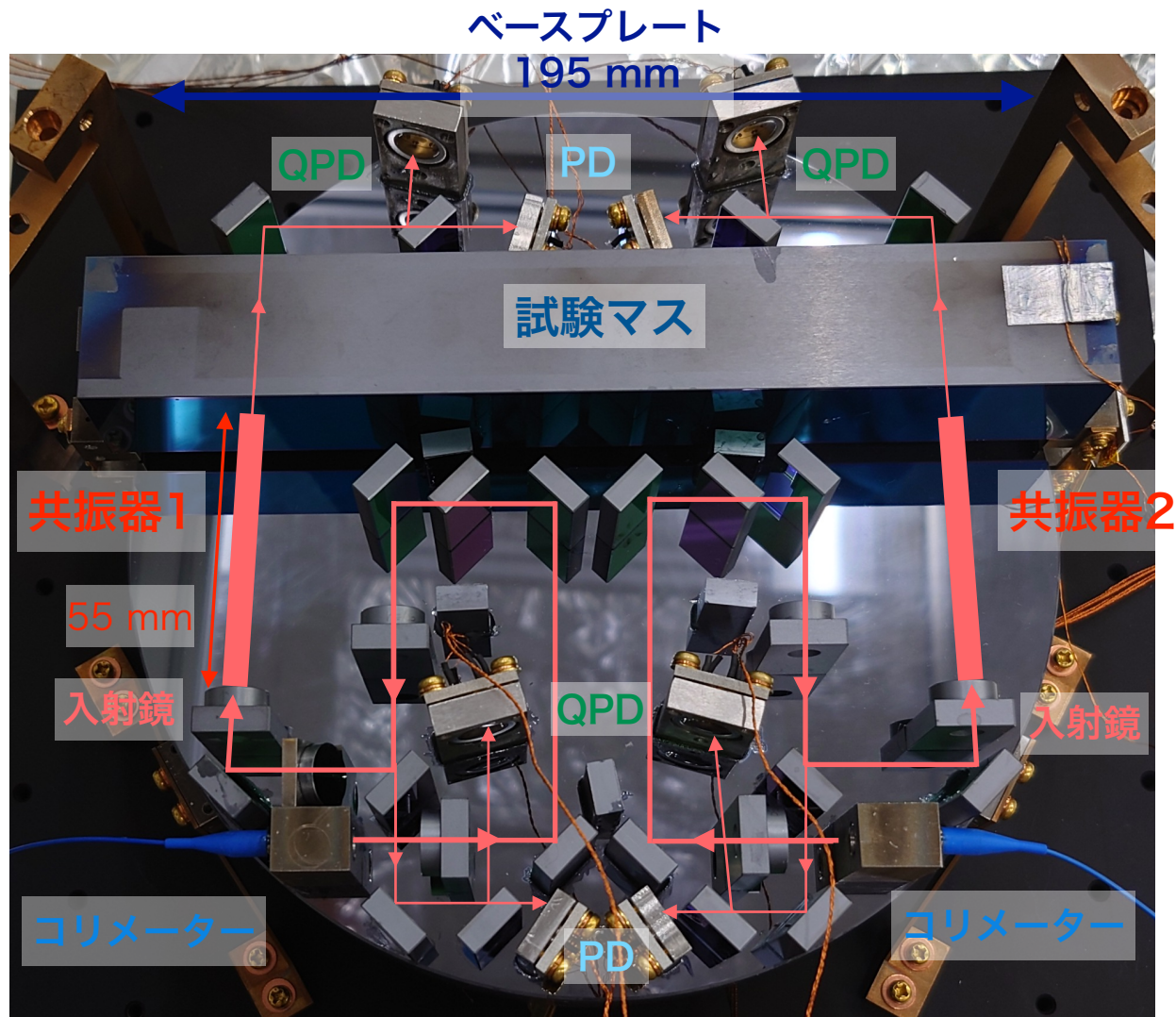
試験マスはヒンジで固定
(冷却時の歪みを吸収)



PD



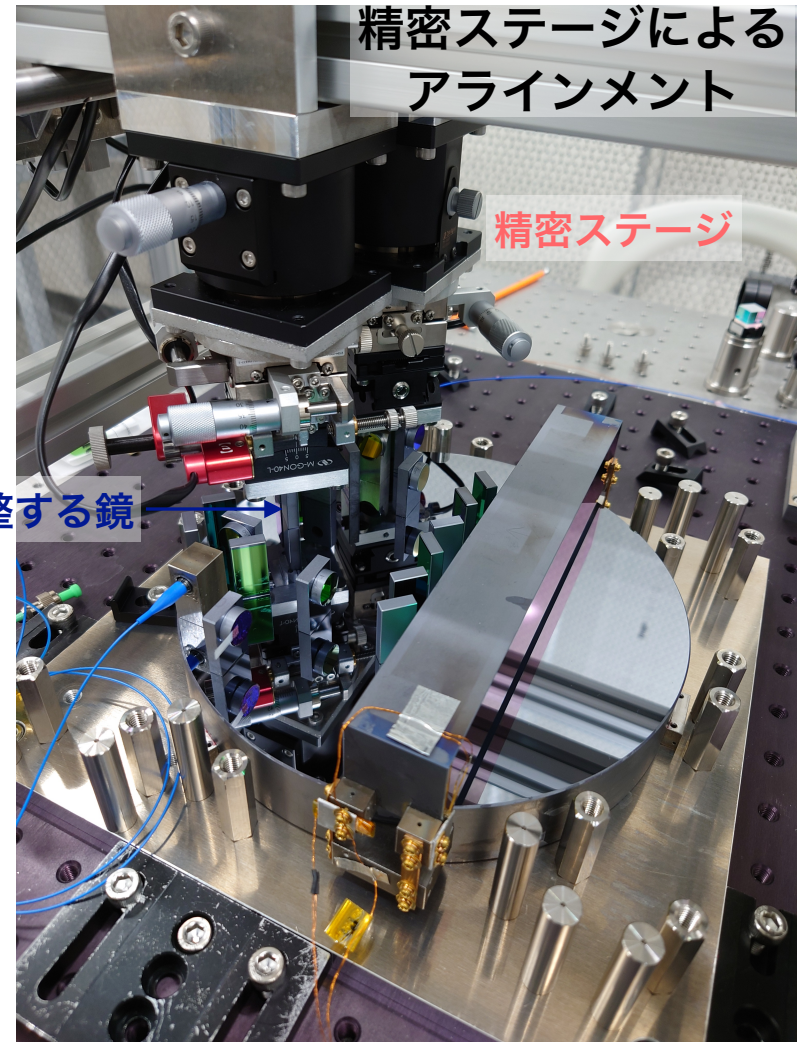
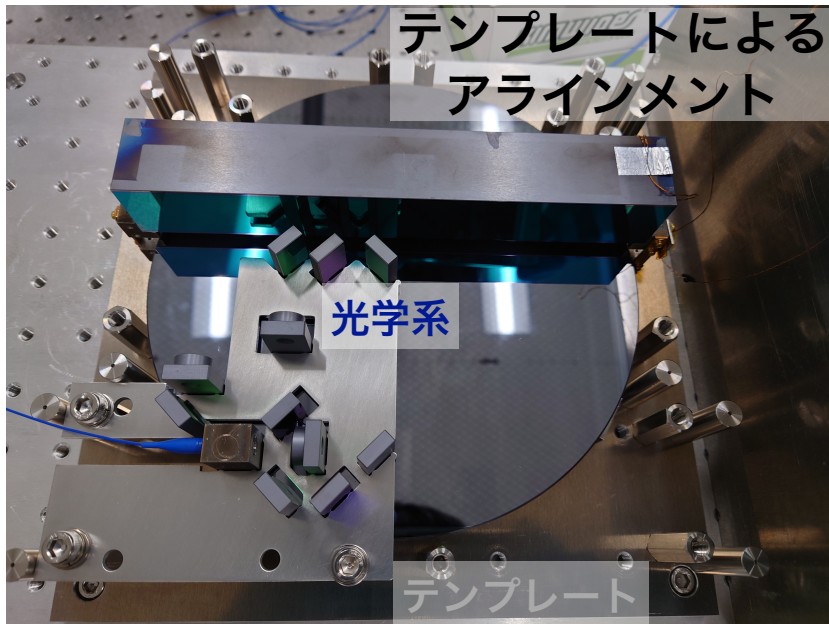
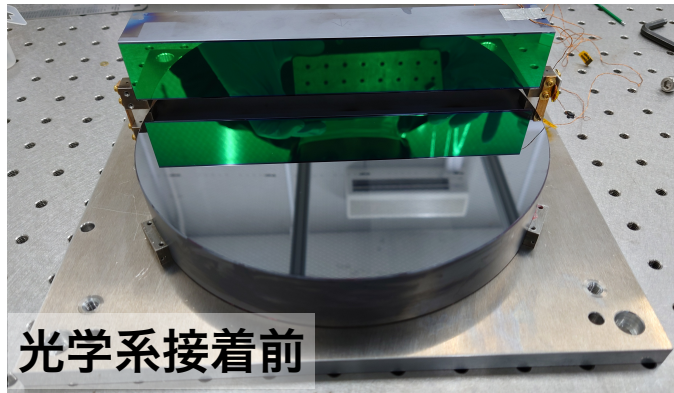
QPD



光学系全体像

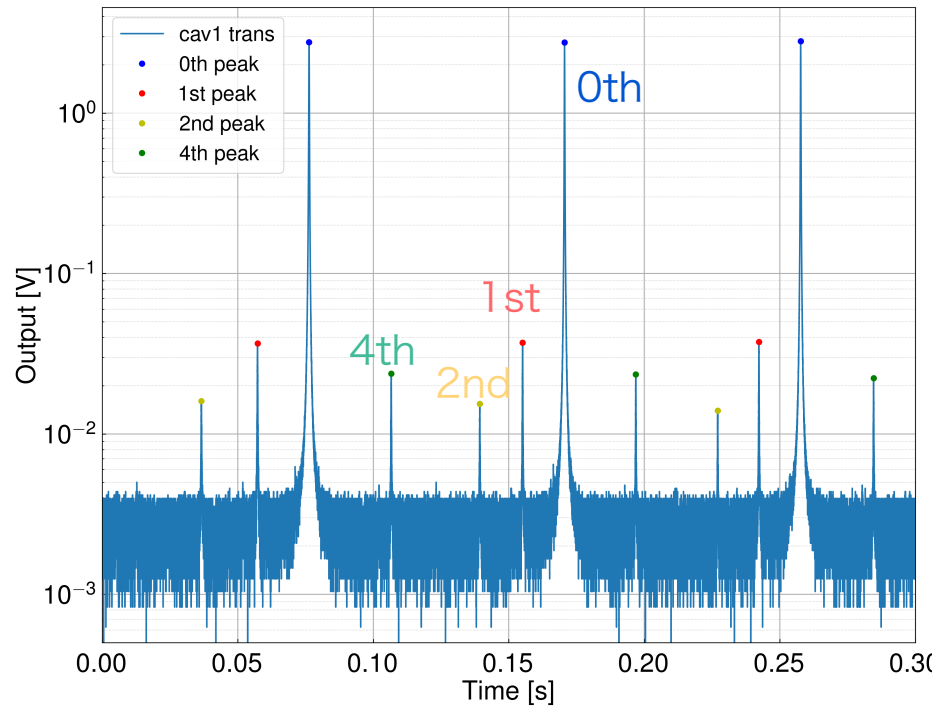
光学系のアライメント

テンプレート + 精密ステージで位置調整, Stycast 1266で接着

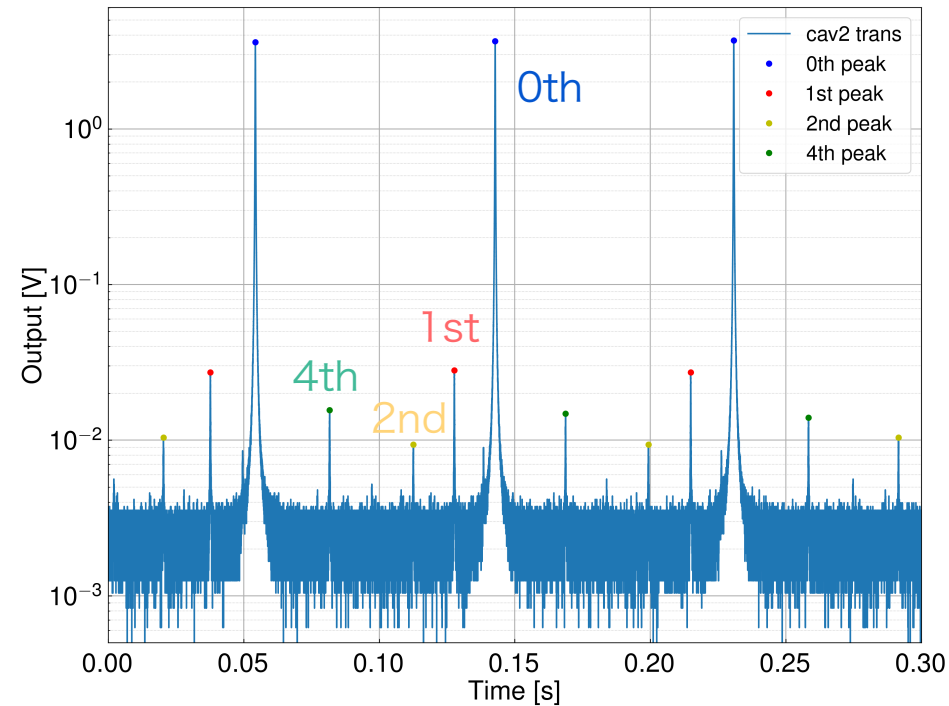


アラインメント精度

キャビティスキャンによりモードマッチ率を評価



共振器1(左): **97.42(6) %**



共振器2(右): **98.59(3) %**

▶アラインメントに問題なし

Contents

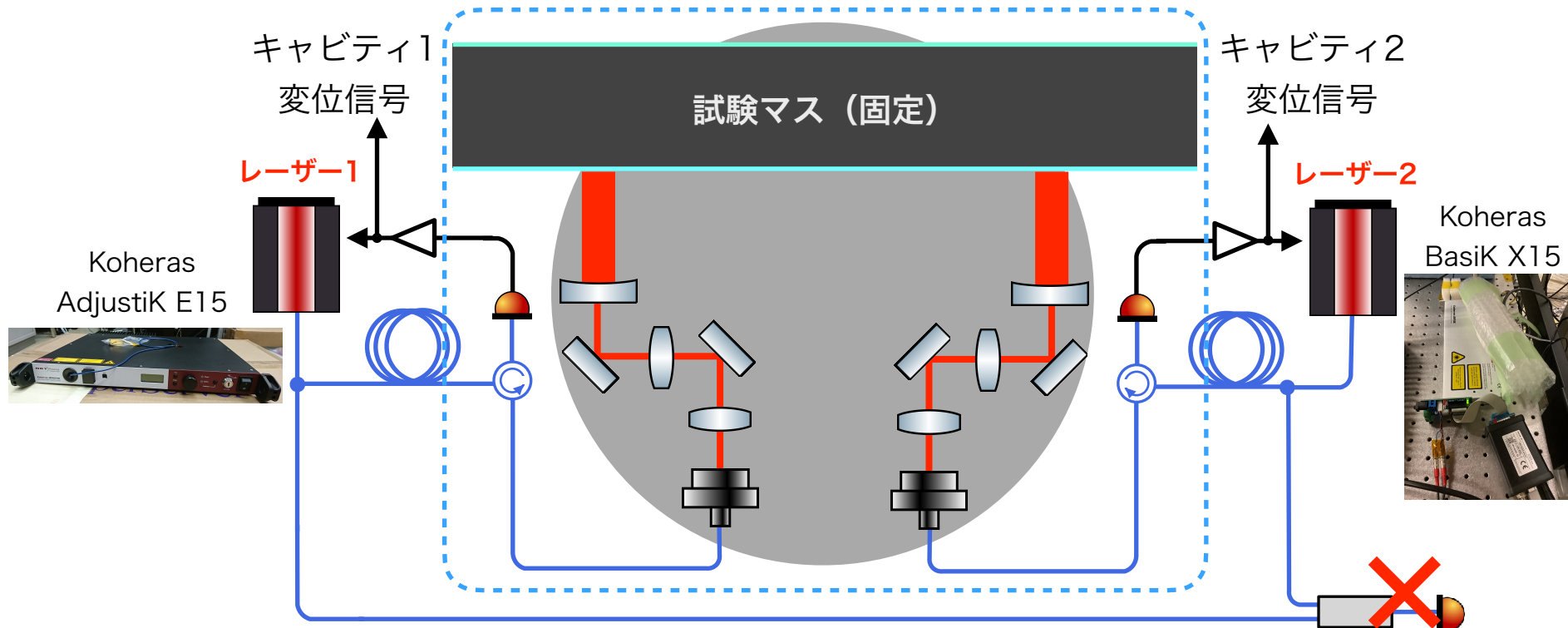
- TOBAについて
- モノリシック光学系の構築
- **測定結果**
- まとめ, 今後の展望

真空下での変位測定

各共振器の変位を測定

- 真空下 (10^{-3} Pa)
- 室温での測定
- 制御信号から変位を推定 (ビート信号なし)

真空, 室温

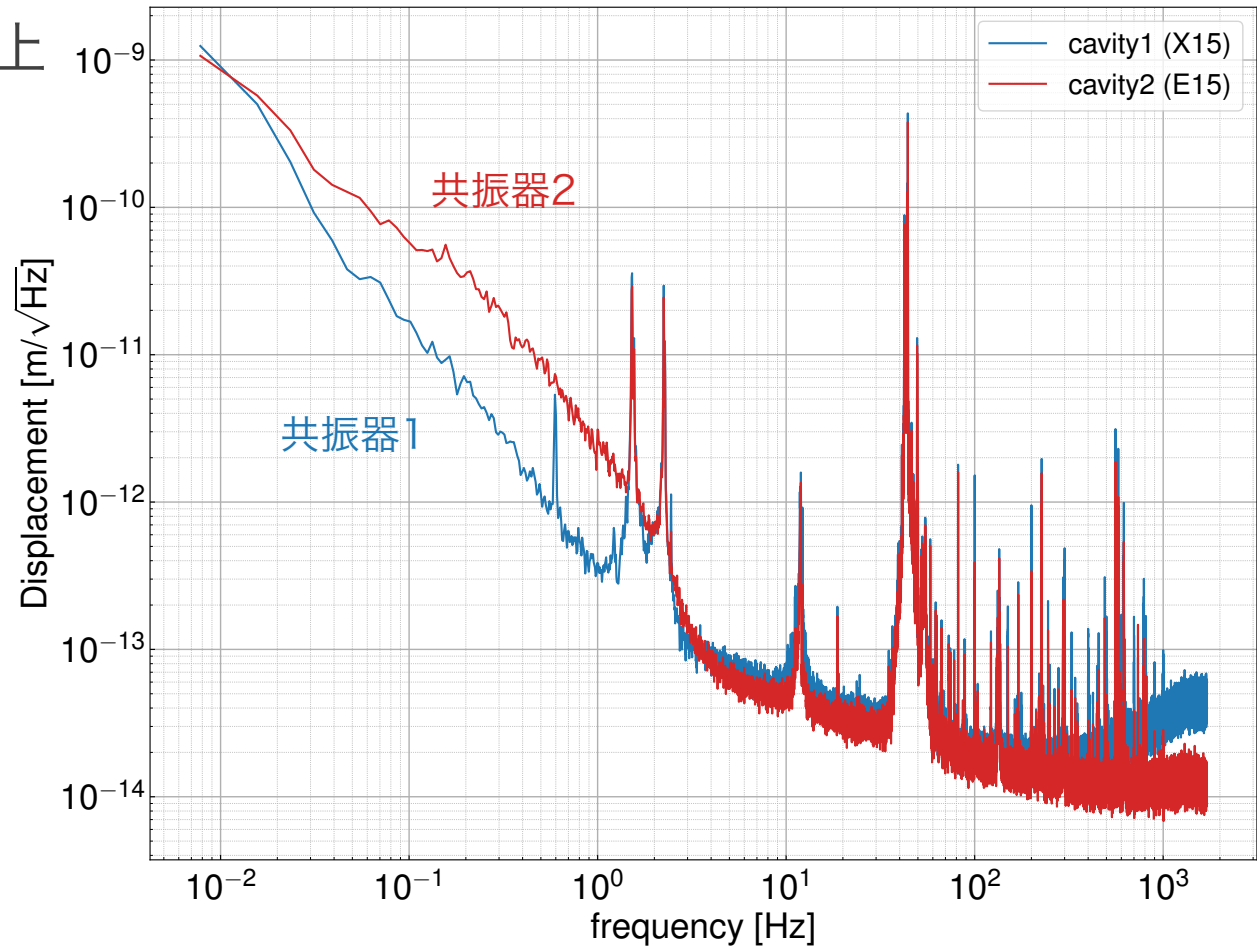


真空下での変位測定結果

各共振器の変位信号

- 0.1 Hzで $\sim 5 \times 10^{-10}$ m/ $\sqrt{\text{Hz}}$

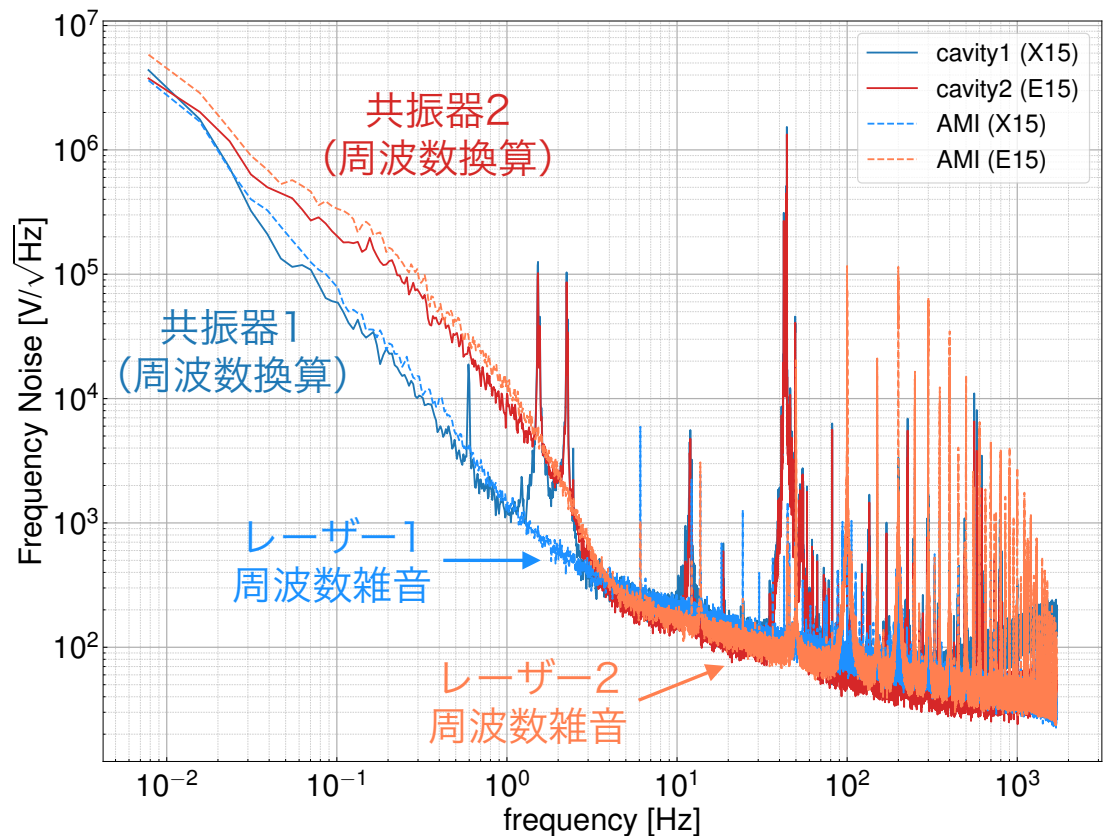
▶ 目標感度まで5桁以上



考察：周波数雑音

主要な雑音源

- 広帯域で周波数雑音
 - 独立に測定したレーザーの周波数雑音と一致
 - ▶ ビート測定で低減
- 懸架系の共振ピーク
 - 地面振動と相関
 - ▶ 懸架系の見直し
 - ▶ 能動防振で低減

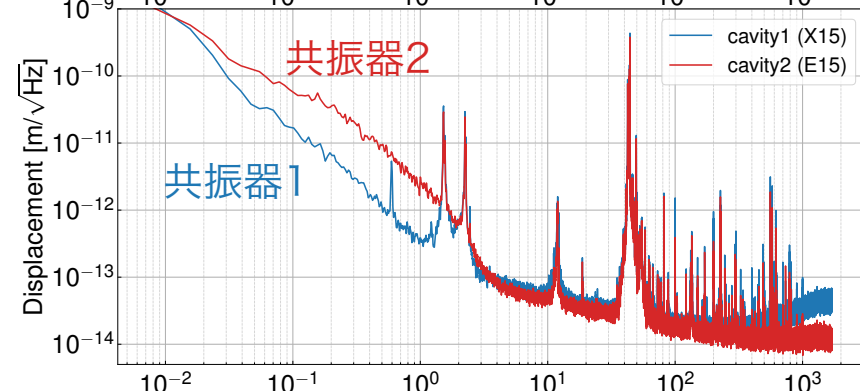
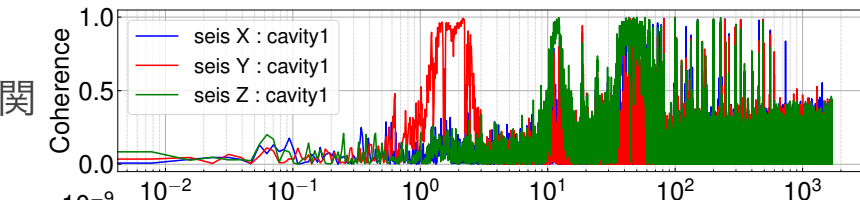


考察：地面振動雑音

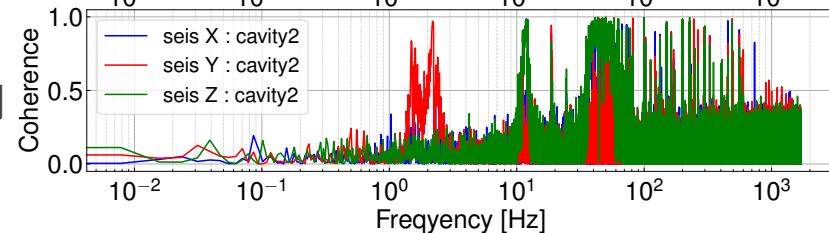
主要な雑音源

- ・ 広帯域で周波数雑音
 - 独立に測定したレーザーの周波数雑音と一致
 - ▶ ビート測定で低減
- ・ 懸架系の共振ピーク
 - 地面振動と相関
 - ▶ 懸架系の見直し
 - ▶ 能動防振で低減

共振器1と
地面振動の相関
(X, Y, Z)

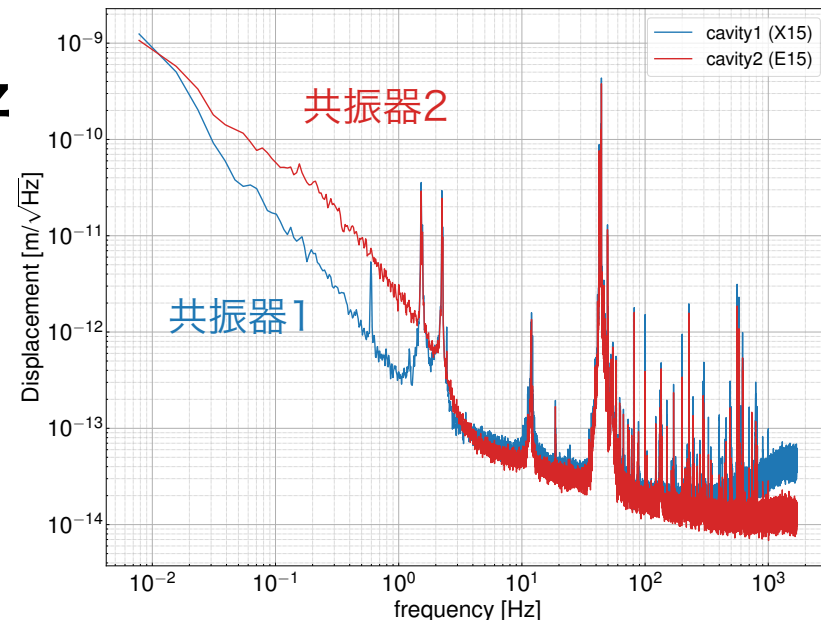


共振器2と
地面振動の相関
(X, Y, Z)



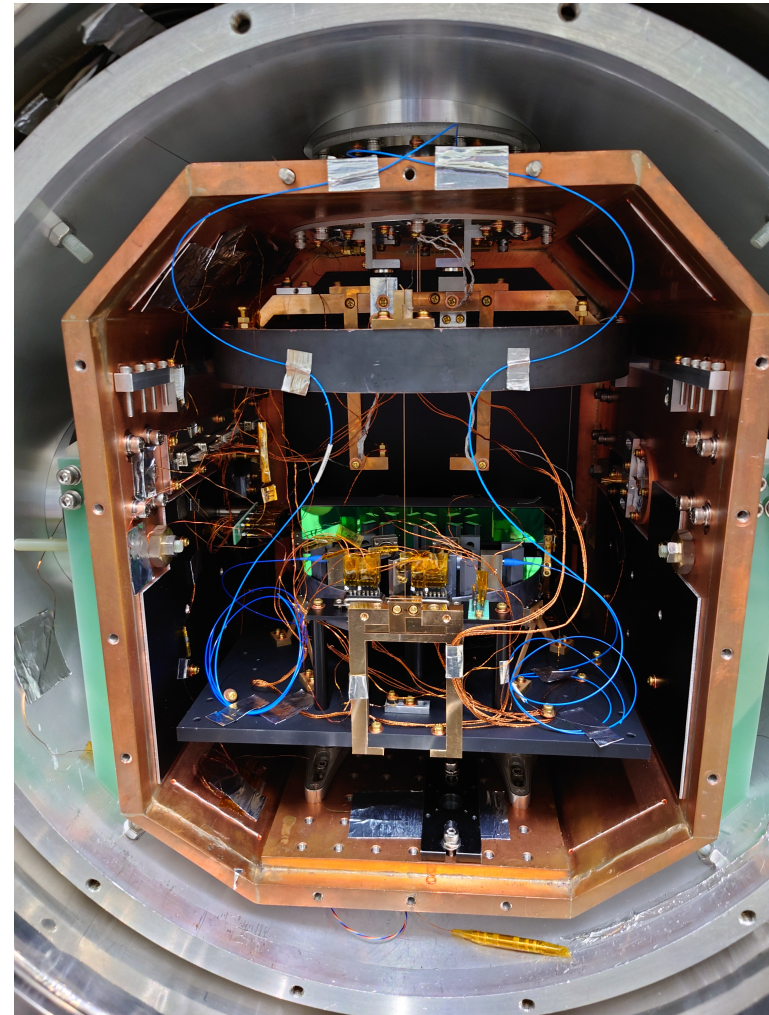
まとめ

- 低周波重力波測定に向けて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 → シリコンでは**世界初**
 - モードマッチ率 > **97 %**
- 共振器の変位感度測定
 - 0.1 Hzにおいて **$5 \times 10^{-10} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$**
 - 地面振動, 周波数雑音が制限
 - ▶ 地面振動: 懸架系・能動防振
 - ▶ 周波数雑音: ビート測定で低減



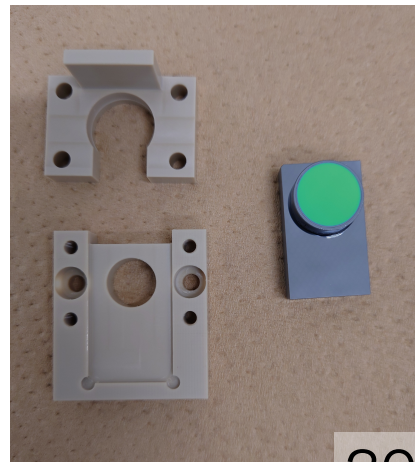
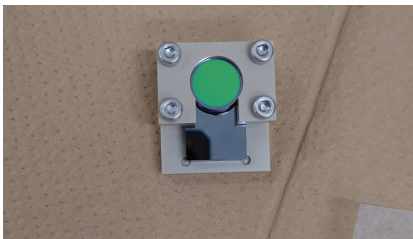
今後の展望

- ビート信号による差動変位の直接測定
 - PLLループ
 - ディレイライン
- 低温下での測定
 - 目下冷却中
 - アライメントずれの評価
 - 変位雑音の評価



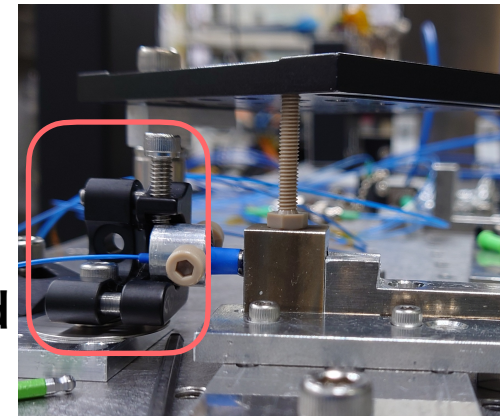
光学素子

- 円形素子（レンズ，入射鏡）
ジグを使ってホルダーに接着

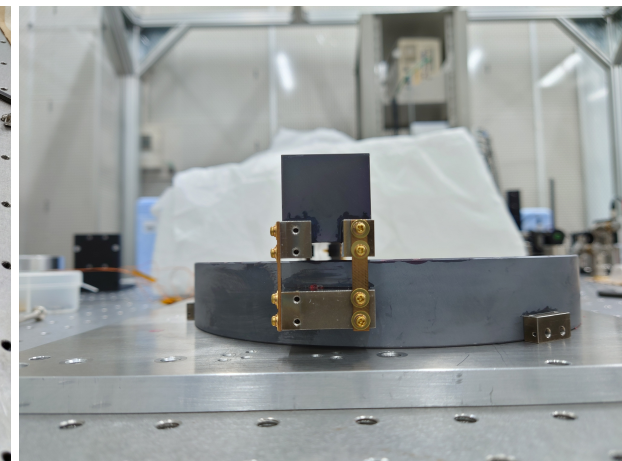
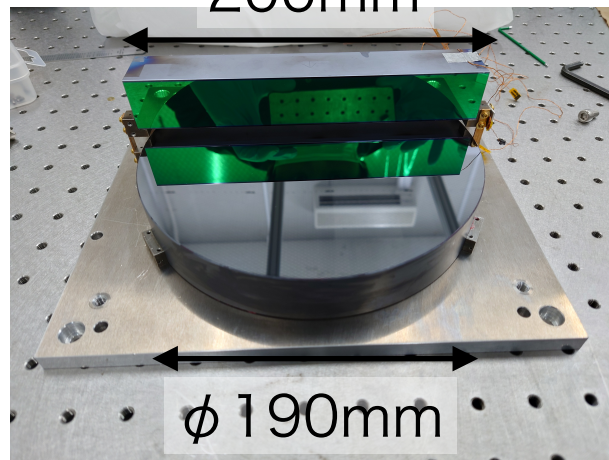


- コリメーター
偏光とアラインメントを確認して
ホルダーに接着

ミラーホルダー
を動かして調整
→ずれは< 3 mrad



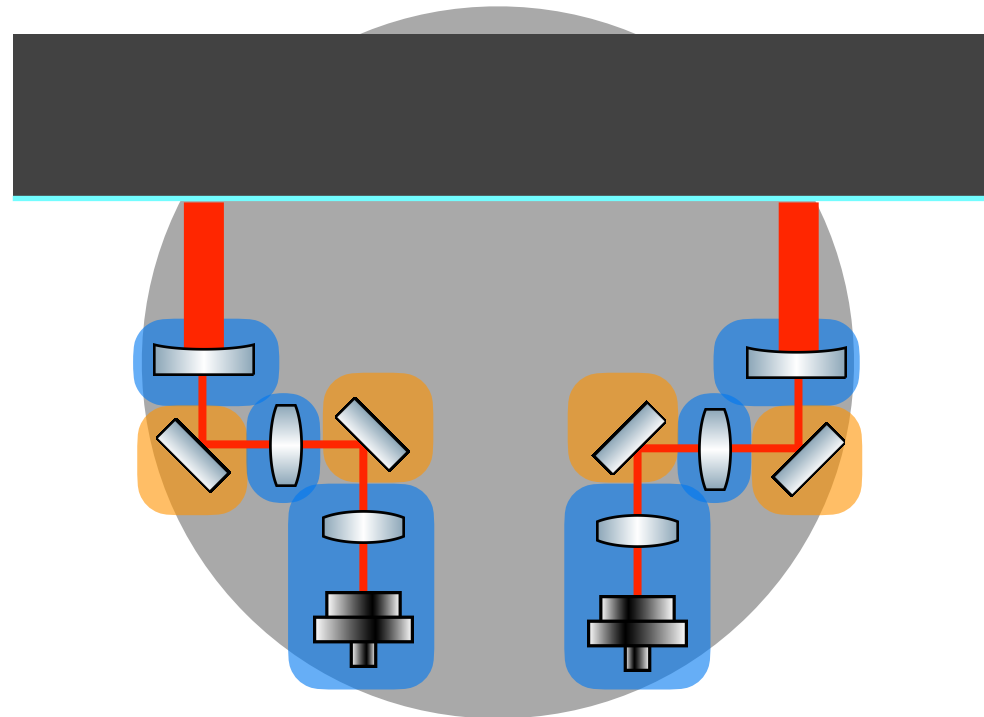
- 試験マス
板状のヒンジで
シリコン基板に固定



アラインメント手法

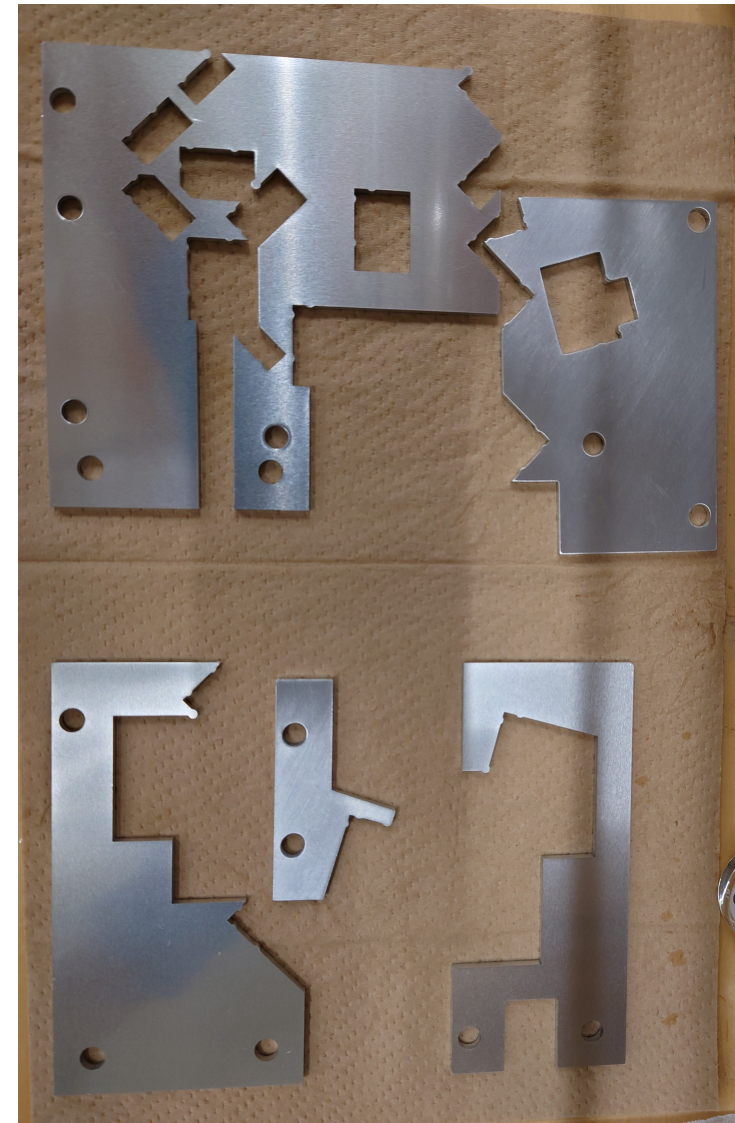
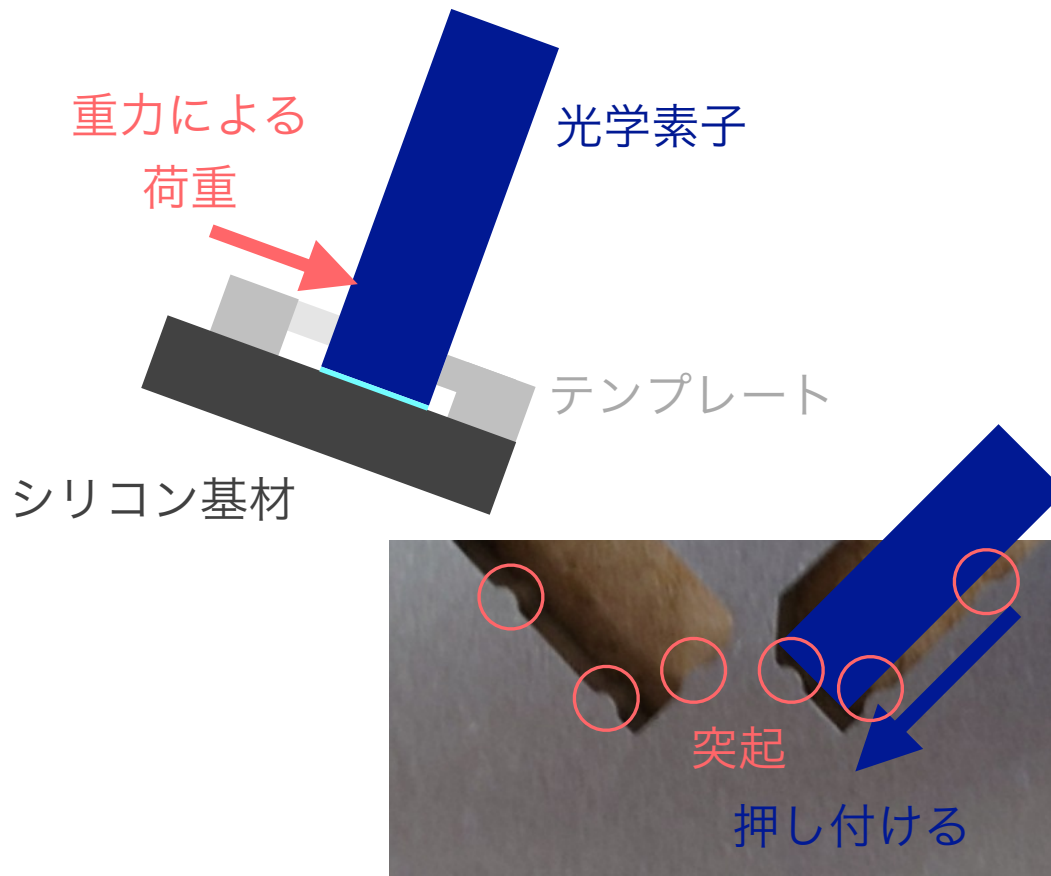
要求精度の異なる2パターンの光学系

- 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

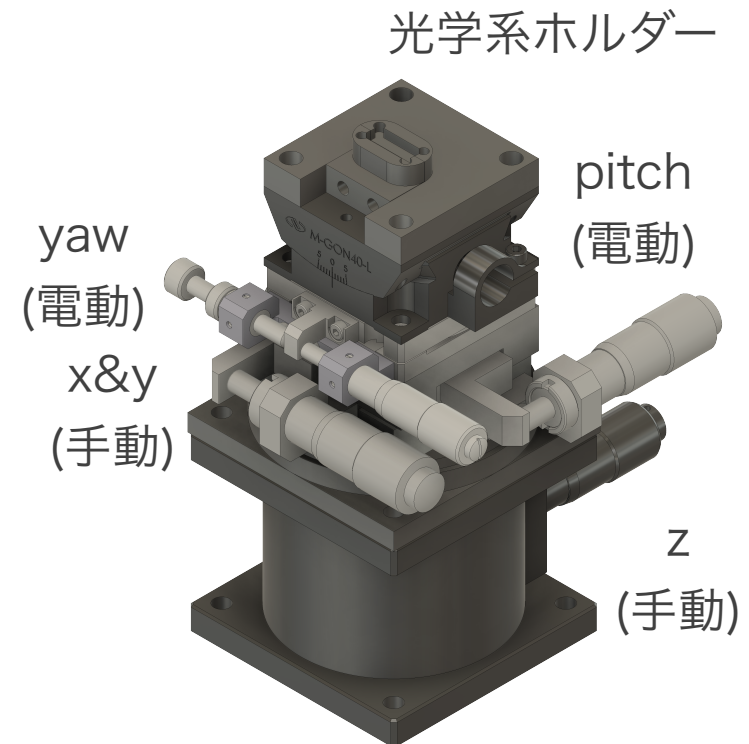
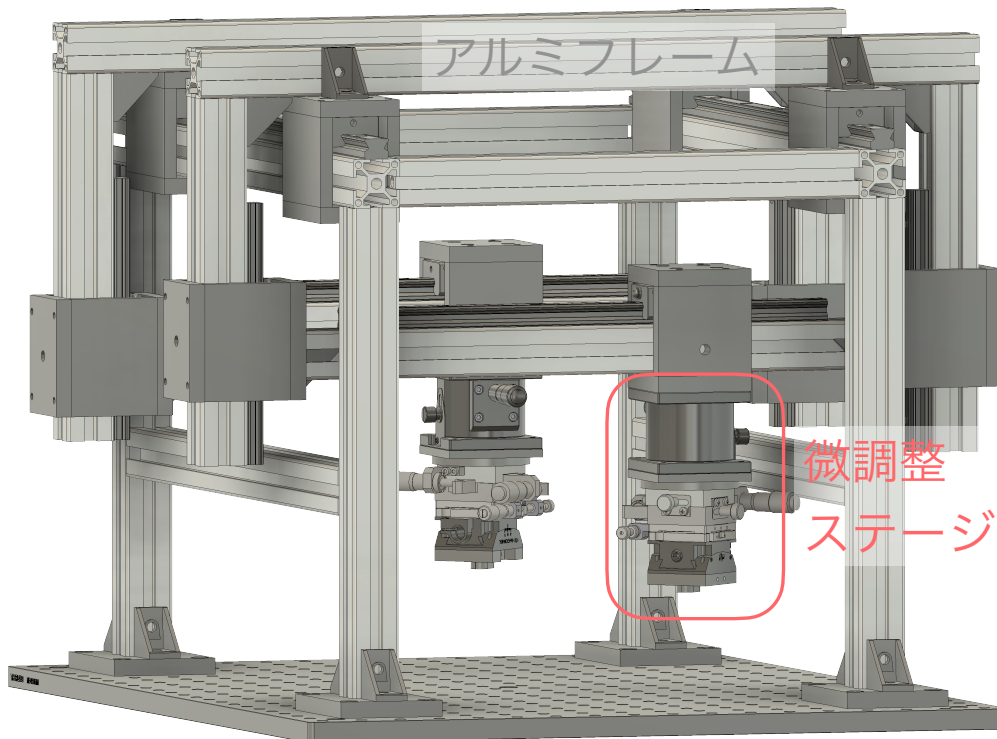
- 突起のついた板に，光学素子を押し付けるような形で固定
- 全体を傾けることで荷重をかける



ステージを用いた微調整

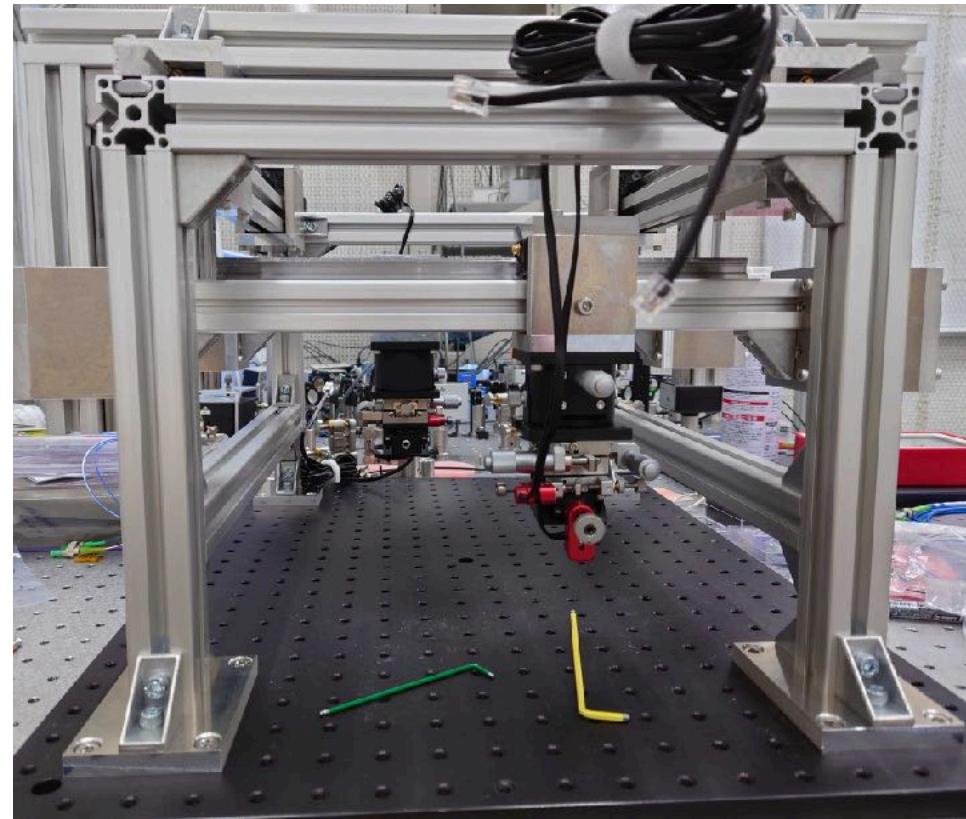
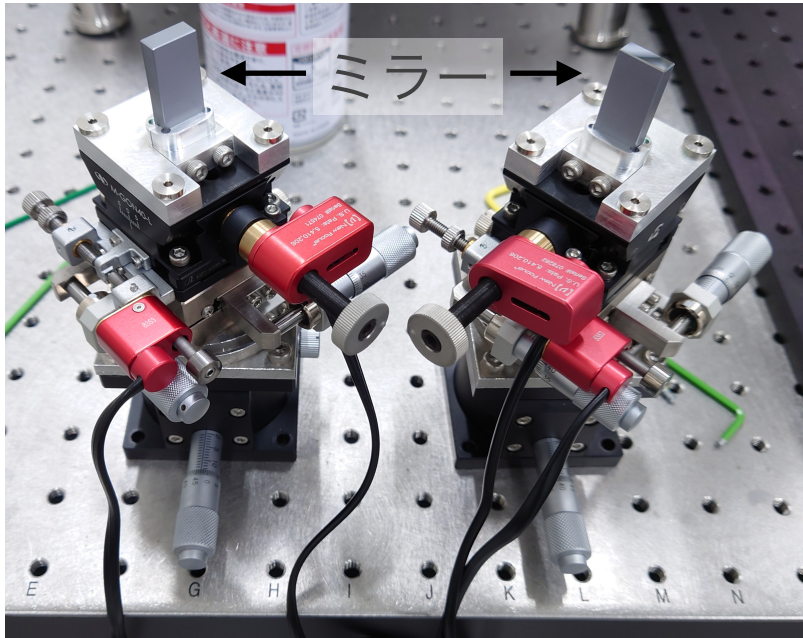
5自由度 (x, y, z, pitch, yaw) に移動可能なステージ x2

- 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)



微調整ステージ

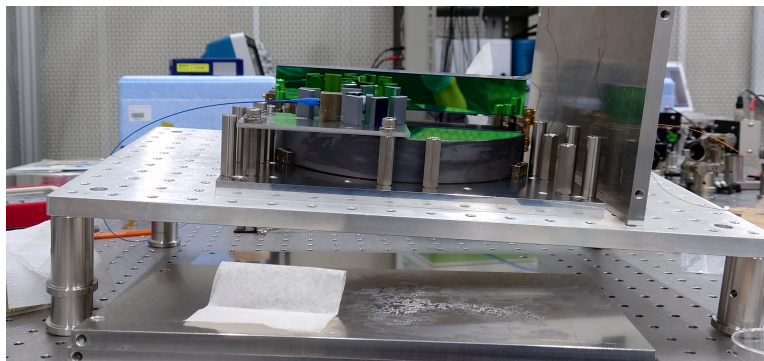
微調ステージ



ステージ全体

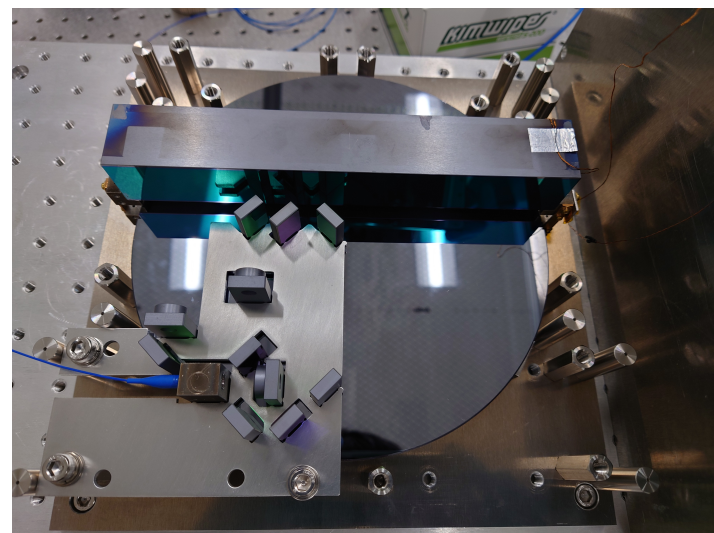
入射光学系の接着

入射光学系の一部をテンプレートで接着

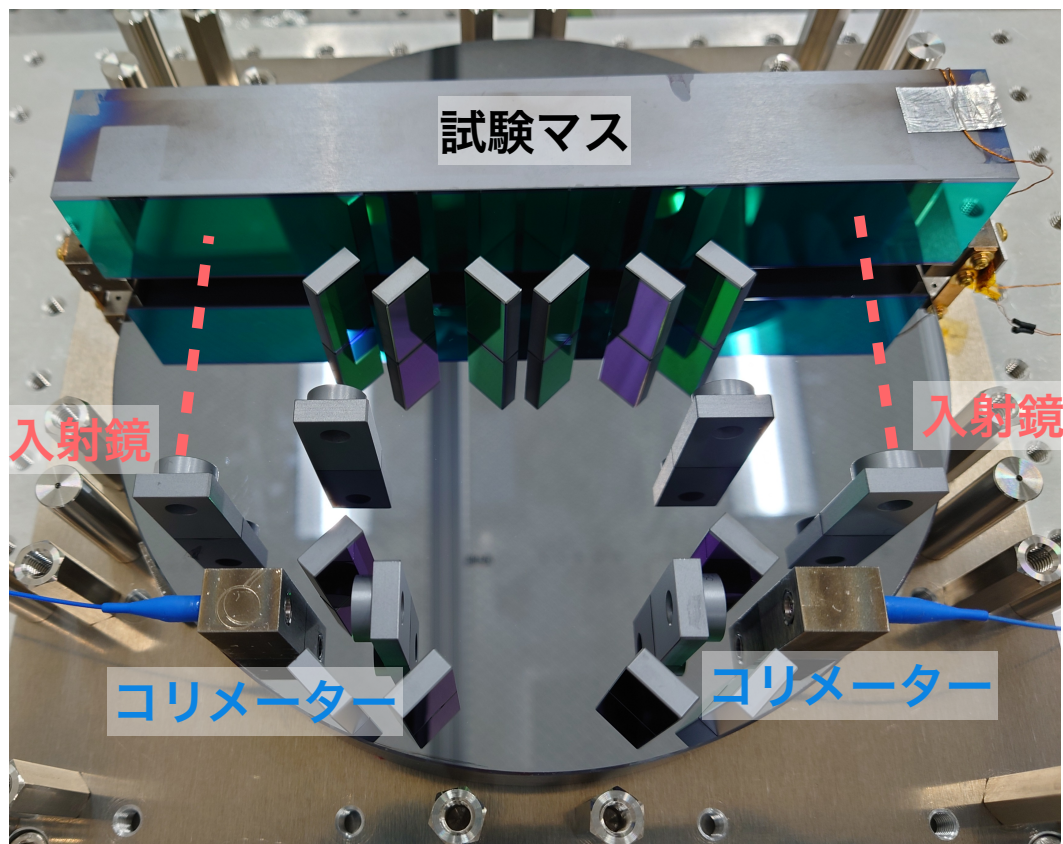


↑ 傾けて重力による荷重をかける

↓ テンプレートで位置決め

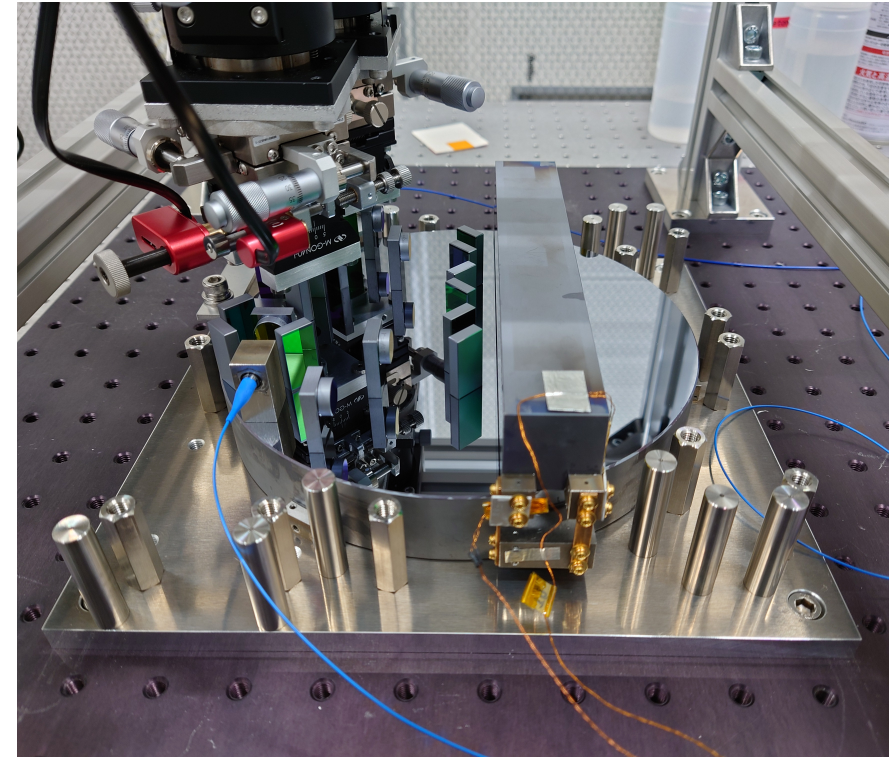
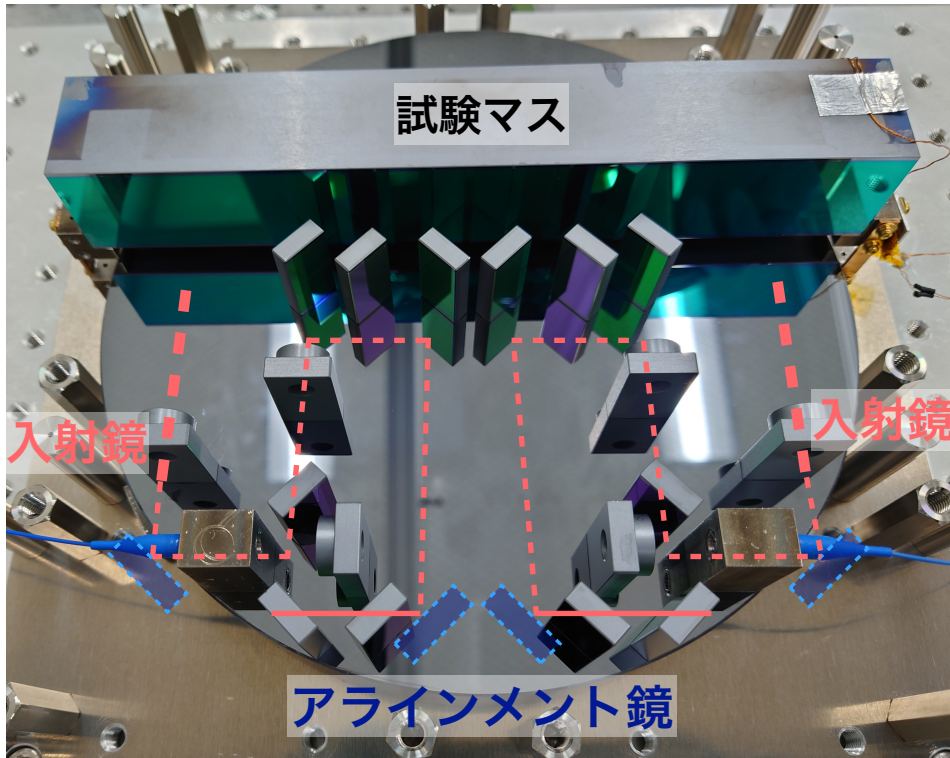


↓ 入射光学系を接着



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



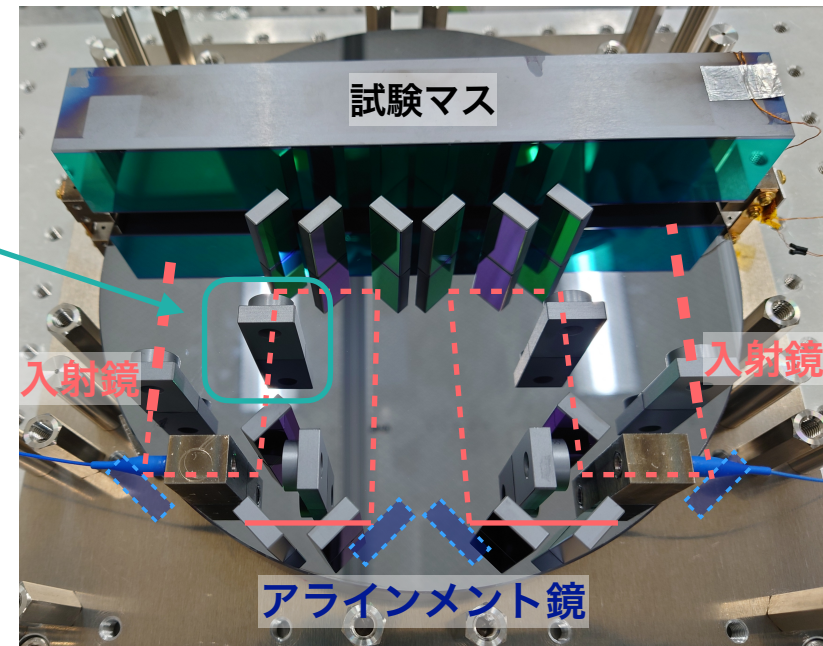
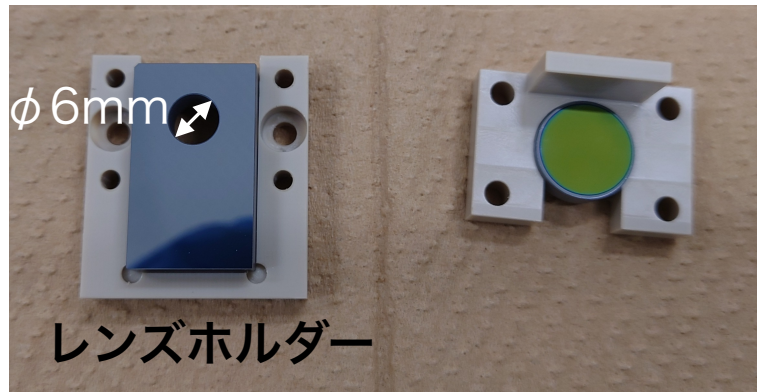
- ▶ 途中でビームがクリップして完全には合わせられていなかった
(モードマッチ率 60%程度が限界)

ビームのクリップ

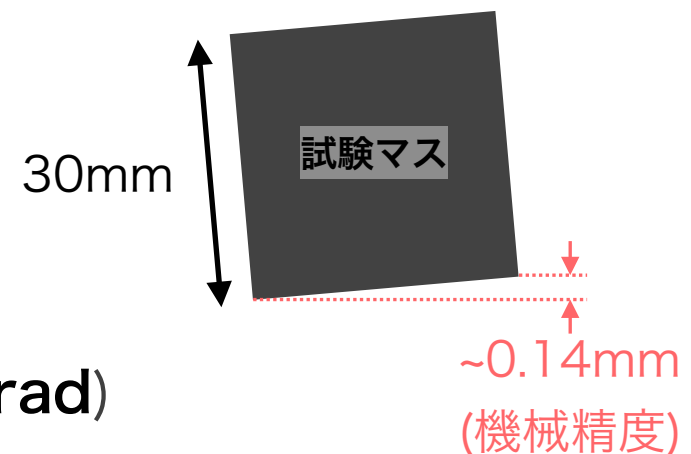
アラインメントを合わせようとする
とレンズホルダーでpitch方向にクリップ

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**

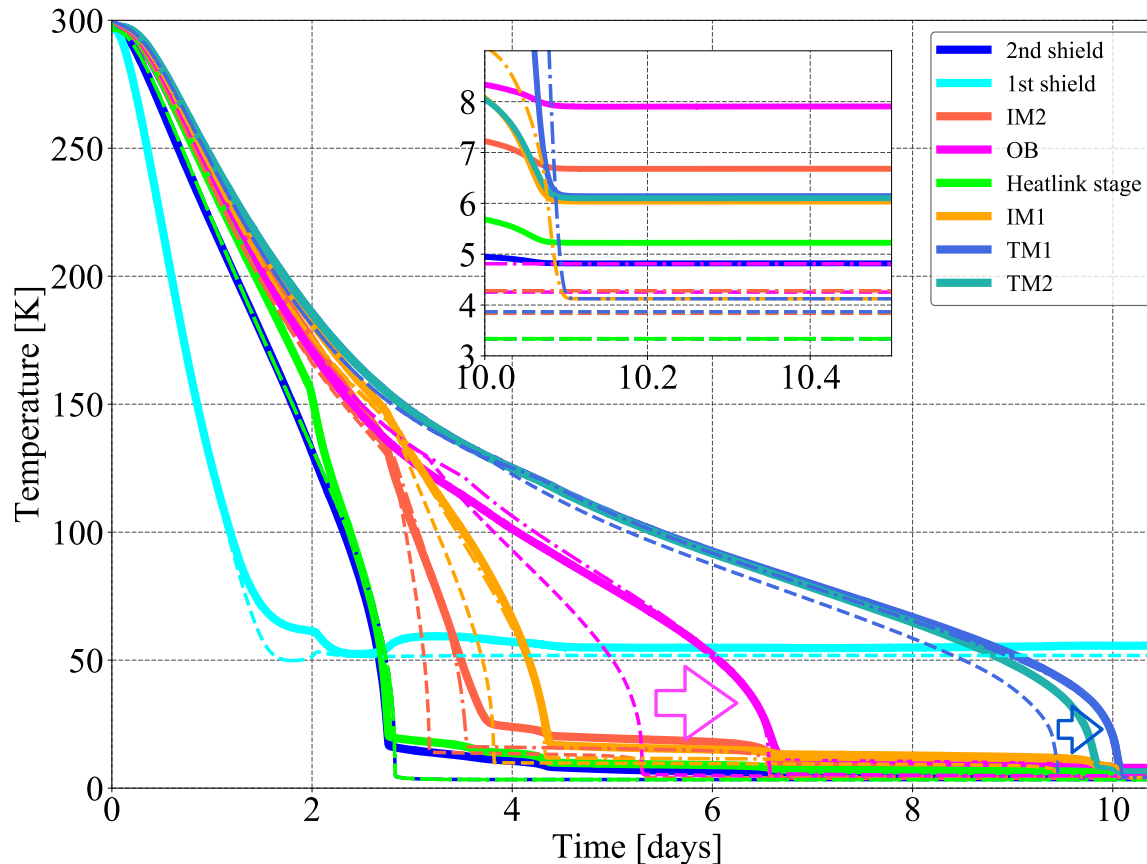


- 試験マスの固定の際のずれによっては
この範囲を越えうる ($0.14/30 \sim 4.7 \text{ mrad}$)

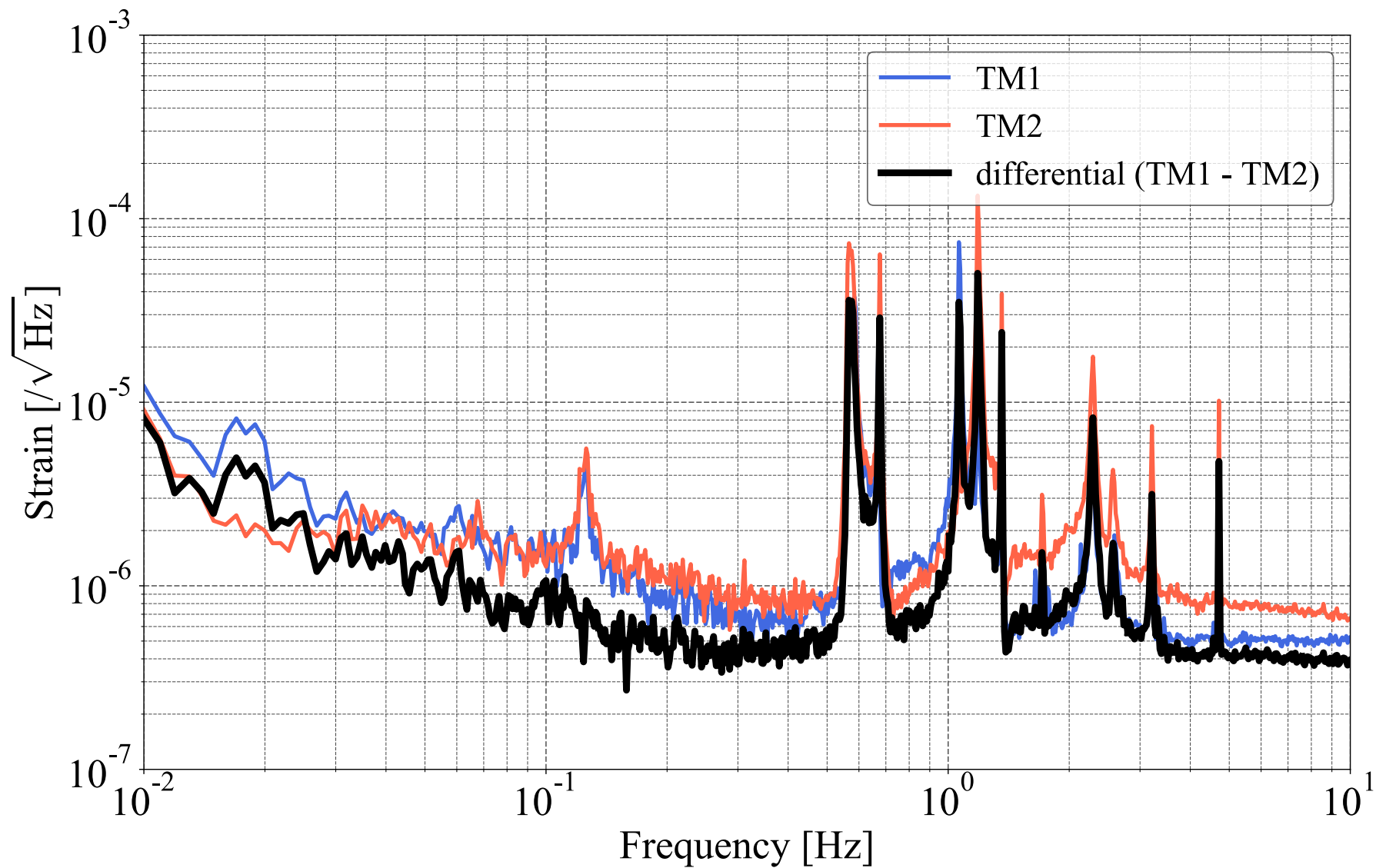


冷却結果

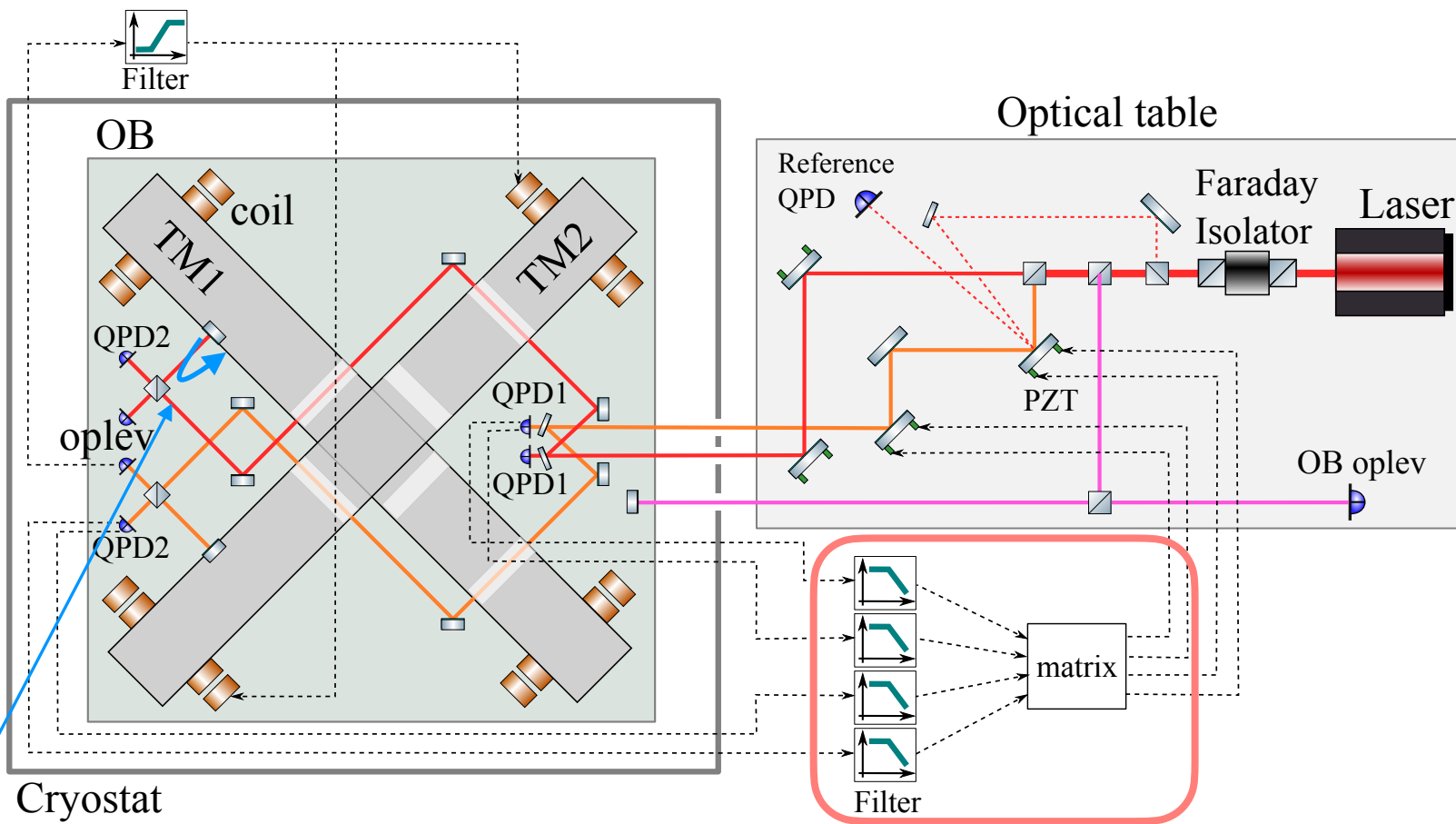
- 6.1 Kまでの冷却に成功 (4 Kの場合より1.2倍の熱雑音)
- 理論よりも冷却速度が遅い
- ▶ ヒートリンクの熱接触が想定よりも悪い



現在の感度



ビームジッター，迷光



迷光雑音：

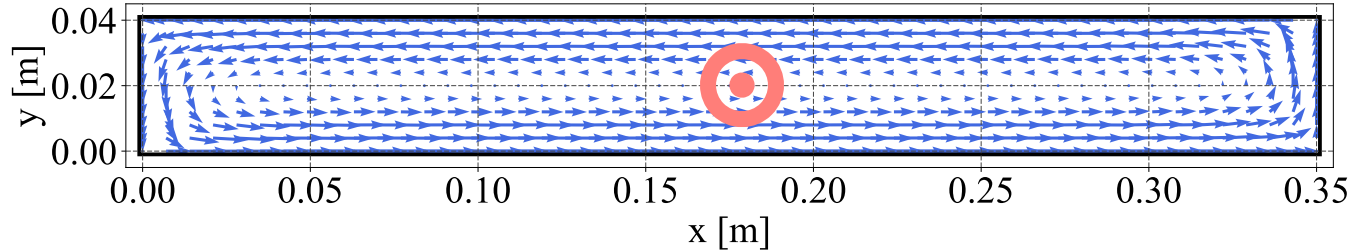
BSの表面反射などによる迷光が計測信号と干渉し，強度変動を起こす雑音

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

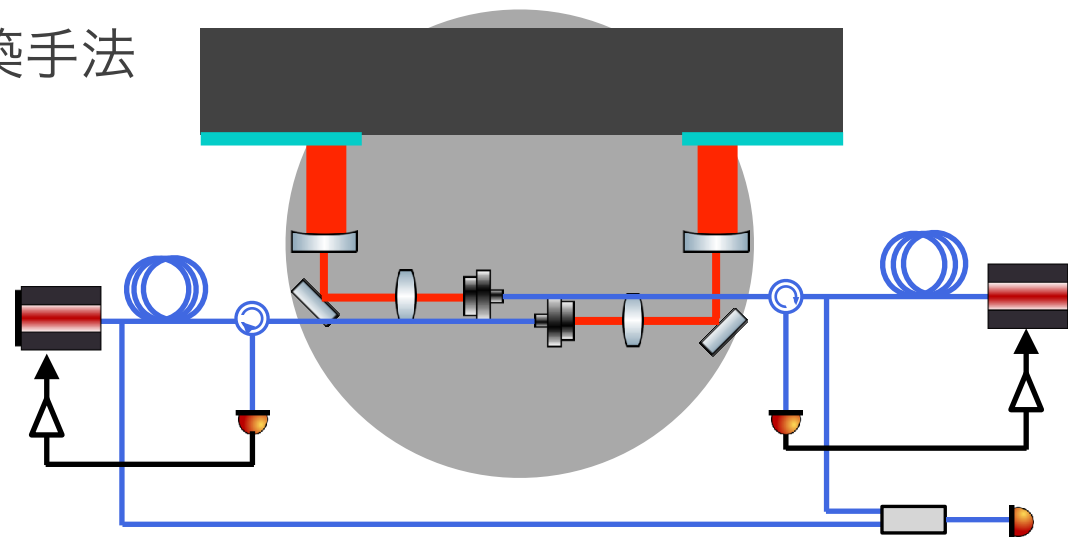
- 環境磁場変動による誘導電流が試験マスに流れ、磁気モーメント μ をもつ
- 環境磁場のDC成分 B とカップルし、トルク雑音 $N=B \times \mu$ が生じる



- 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

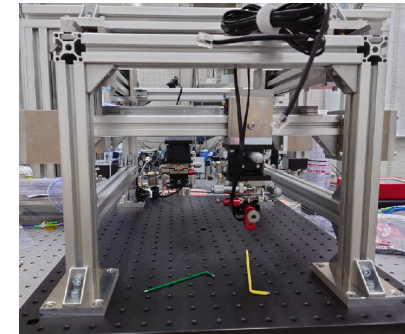
- モノリシック光学系の構築手法
 - 接着方法
 - アライメント方法
- 低温における動作
 - コリメーター
 - アライメントずれ
 - PDの動作（透過光，強度モニター用， etc.）
- 光学系の雑音レベルの測定
 - 測定系（レーザー，電気回路， …）



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

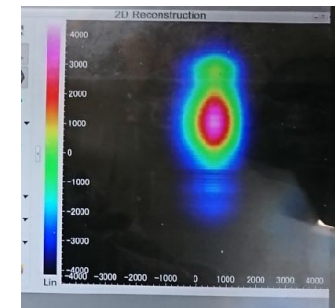
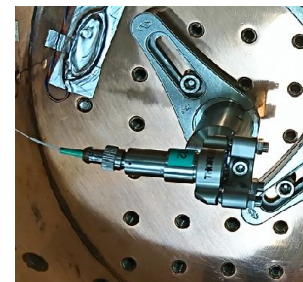
開発項目

- 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



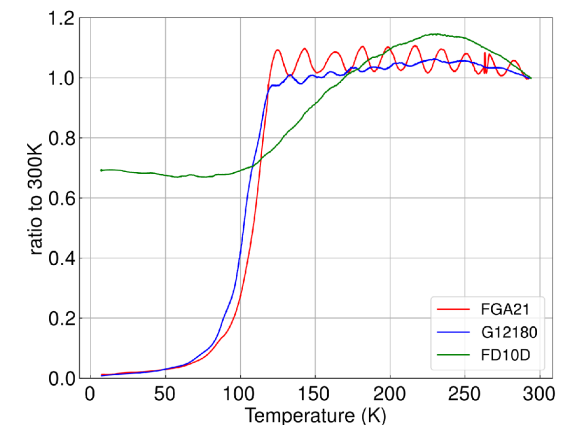
- PDの動作 (透過光, 強度モニター用, etc.) → 動作確認

- 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

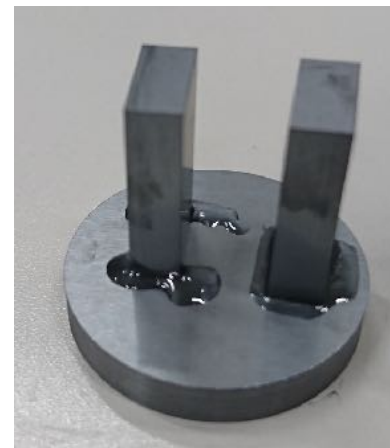
エポキシ

- NOA63
- NOA81

紫外線硬化樹脂



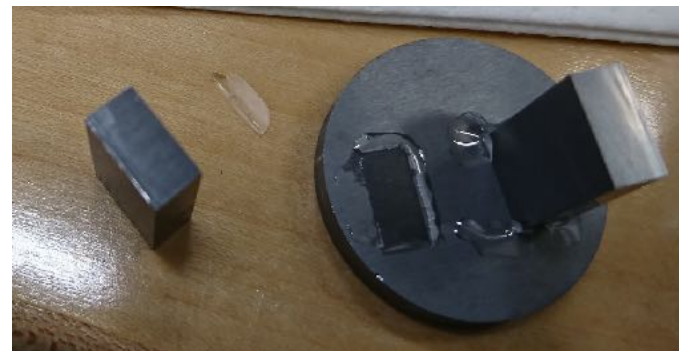
冷却&
昇温後



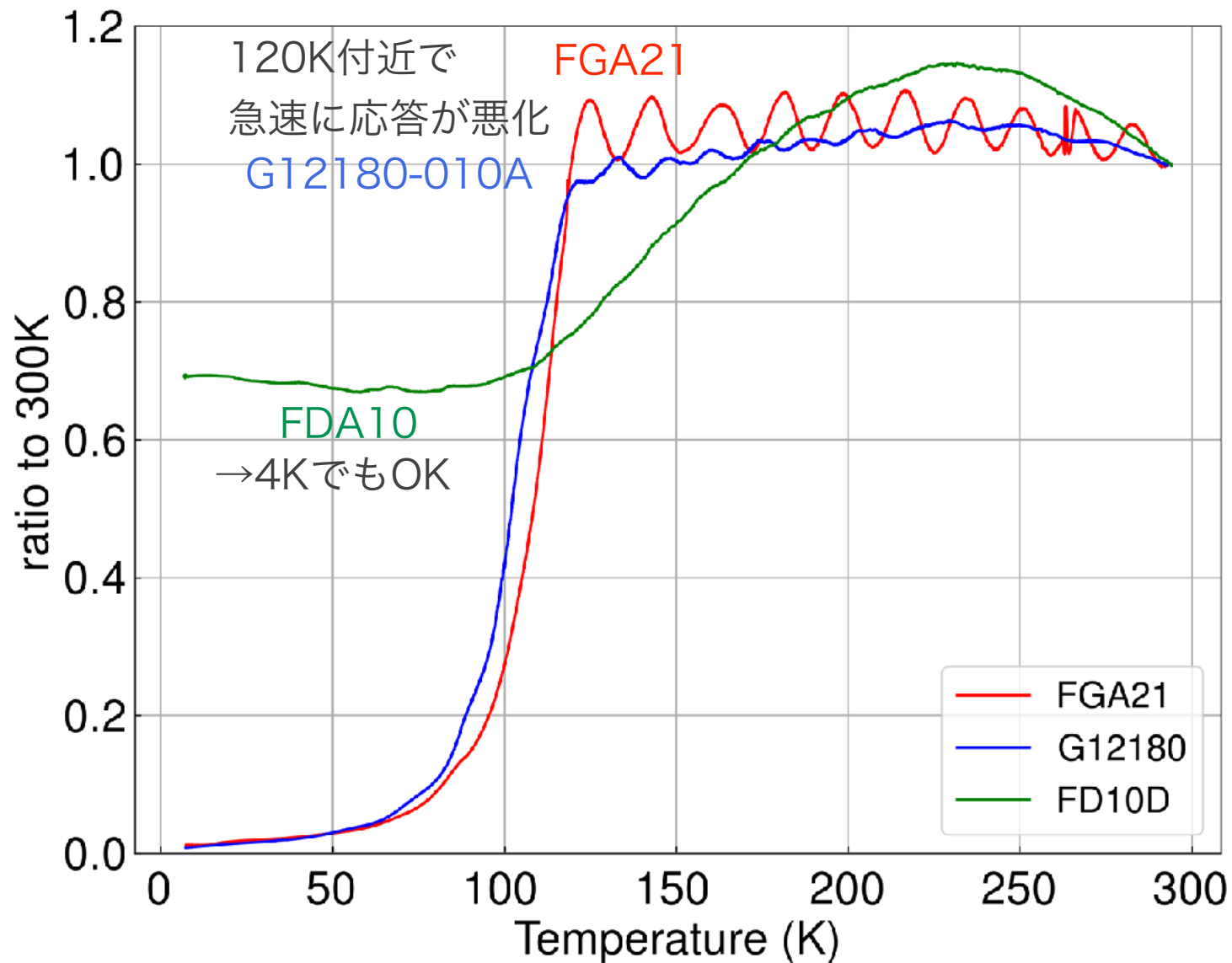
で接着し，4Kまで冷却

- ▶ 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



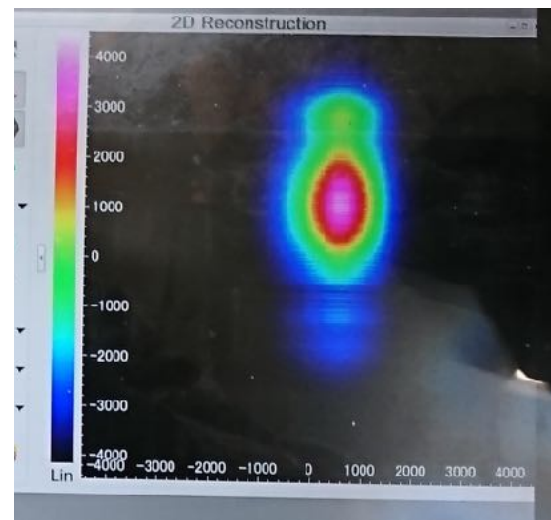
フォトダイオード



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



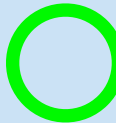















- 他の種類のコリメーターでも同様の現象
 - ▶ 低温化でレンズの位置が変化した可能性

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

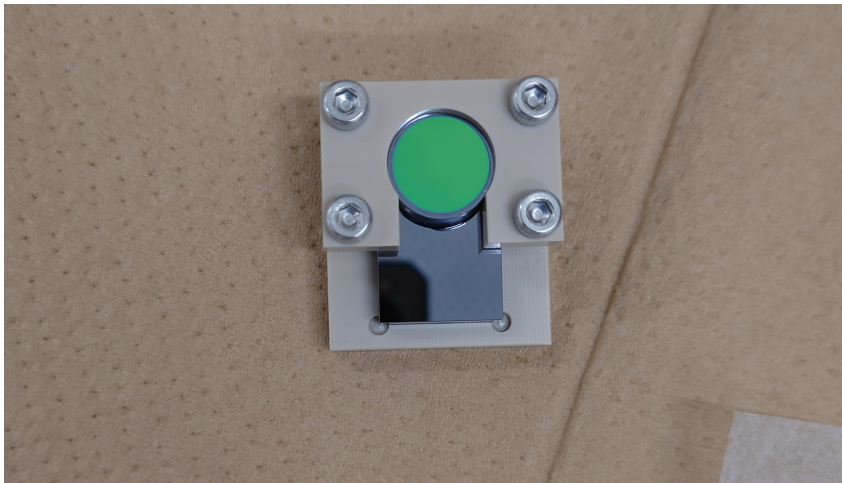
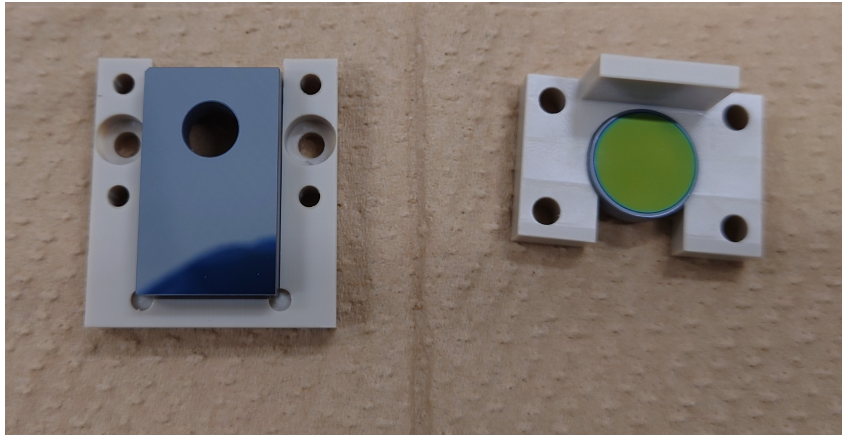
干渉計構成

	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

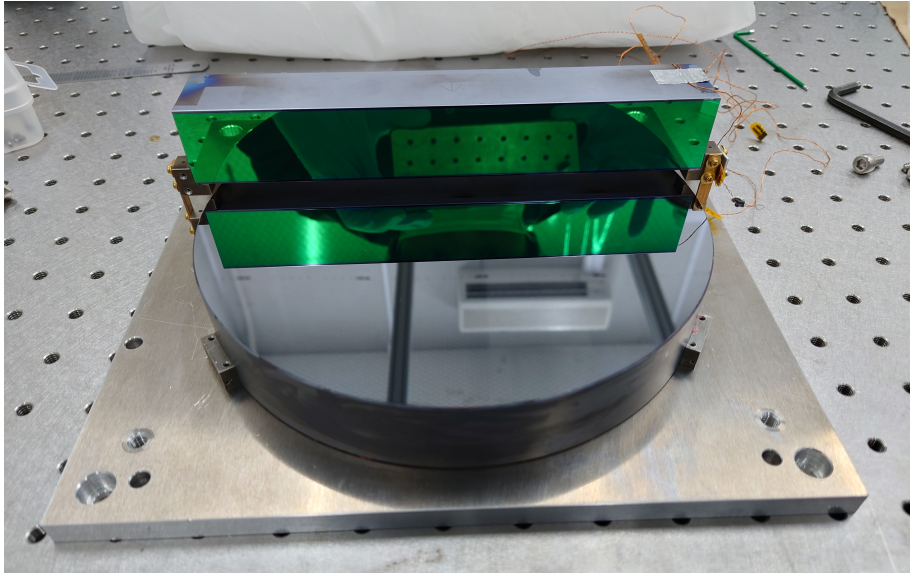
Extra Photos

- Lens & cavity mirror bonding

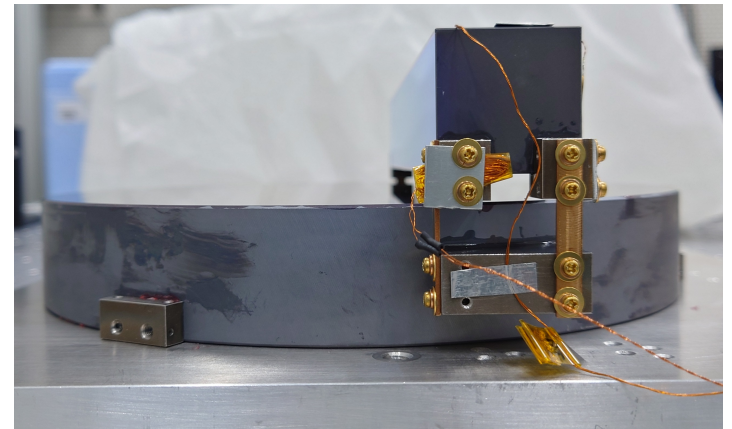
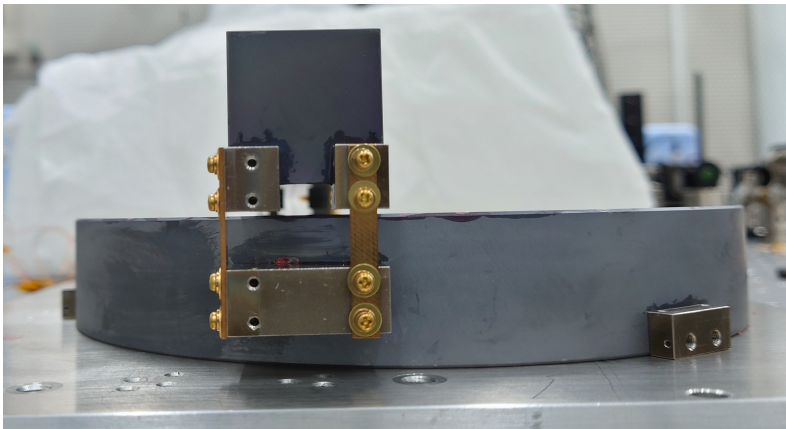
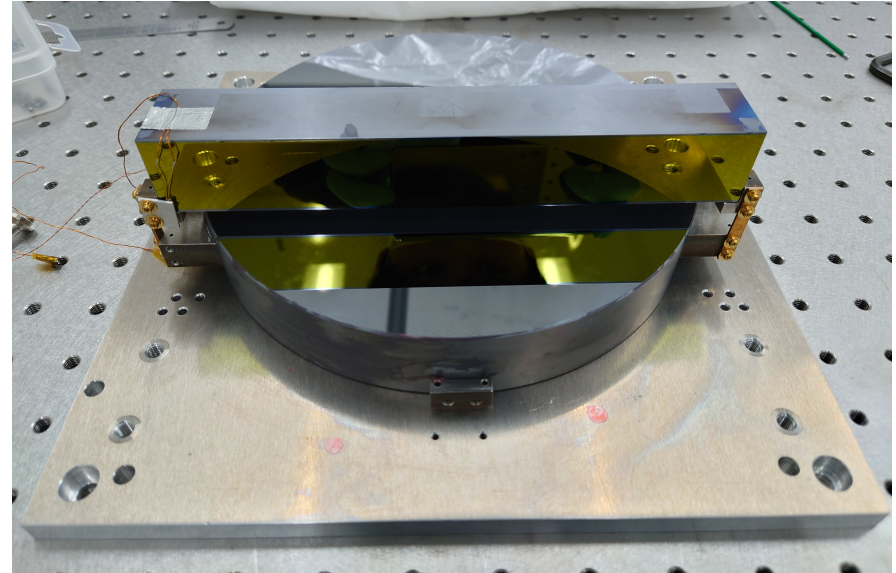


TM Support

HR side

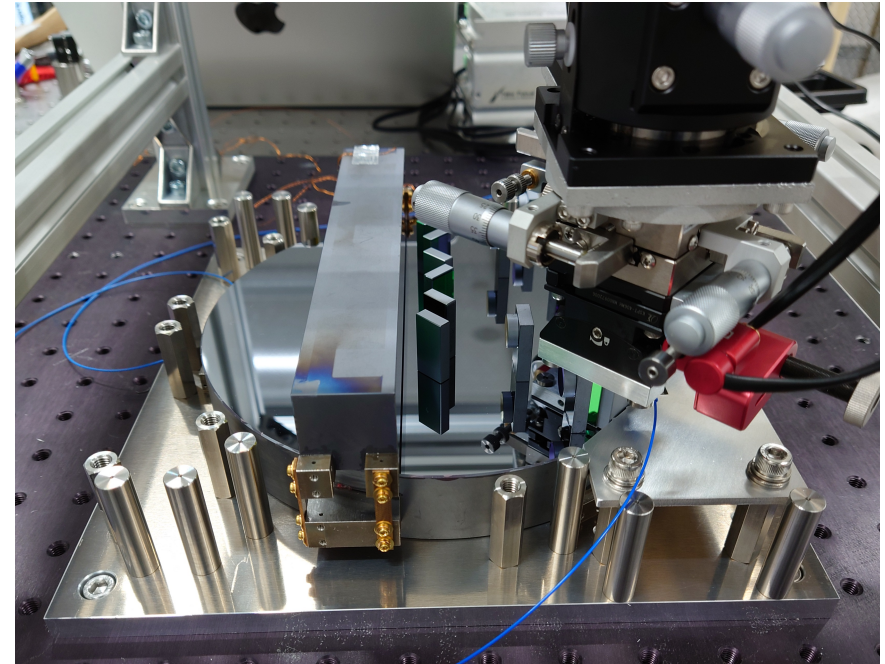
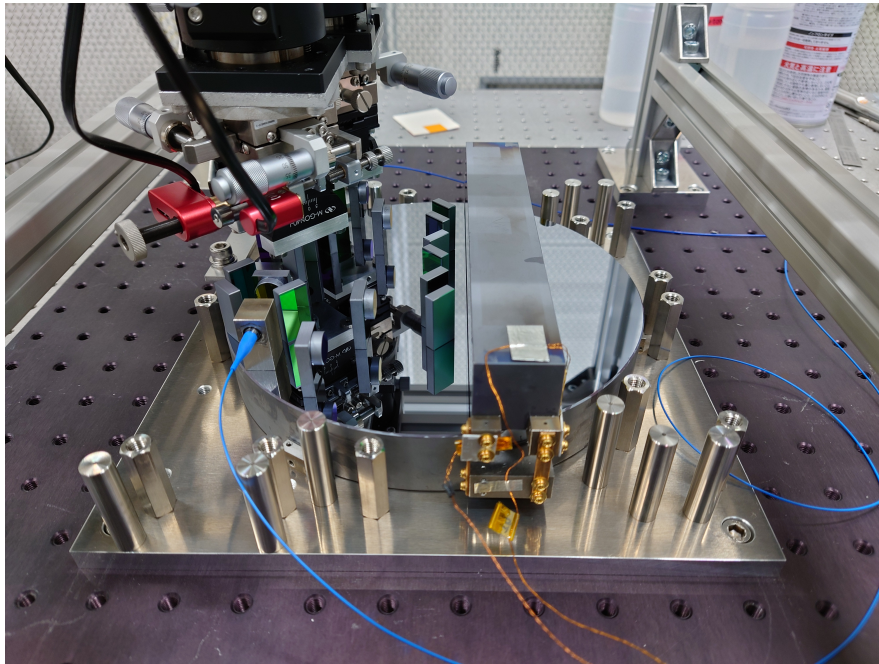


AR side



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

