

ねじれ振り子型重力波望遠鏡

TOBAの開発(33):

低温モノリシック光学系の構築

高野 哲, Ooi Ching Pin, 大島 由佳, 道村 唯太, 安東 正樹

東大理



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
- 高感度化に向けた読み取り光学系の改良
 - ◎ 光ファイバー + モノリシック光学系
 - ◎ 差動Fabry-Perot干渉計
- モノリシック光学系を構築する手法の確立

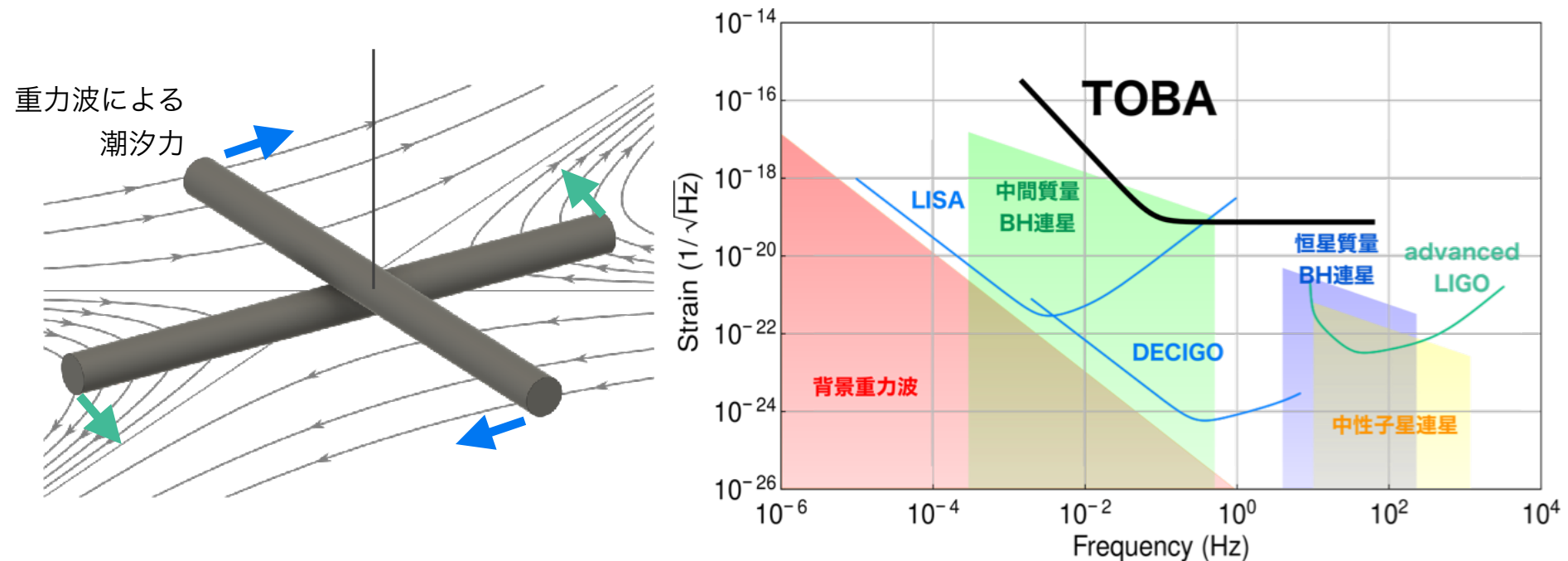
Contents

- TOBAについて
- TOBAの読み取り光学系
- モノリシック光学系の開発
 - ▶ 光学系デザイン
 - ▶ アライメント手法
- まとめ, 今後の展望

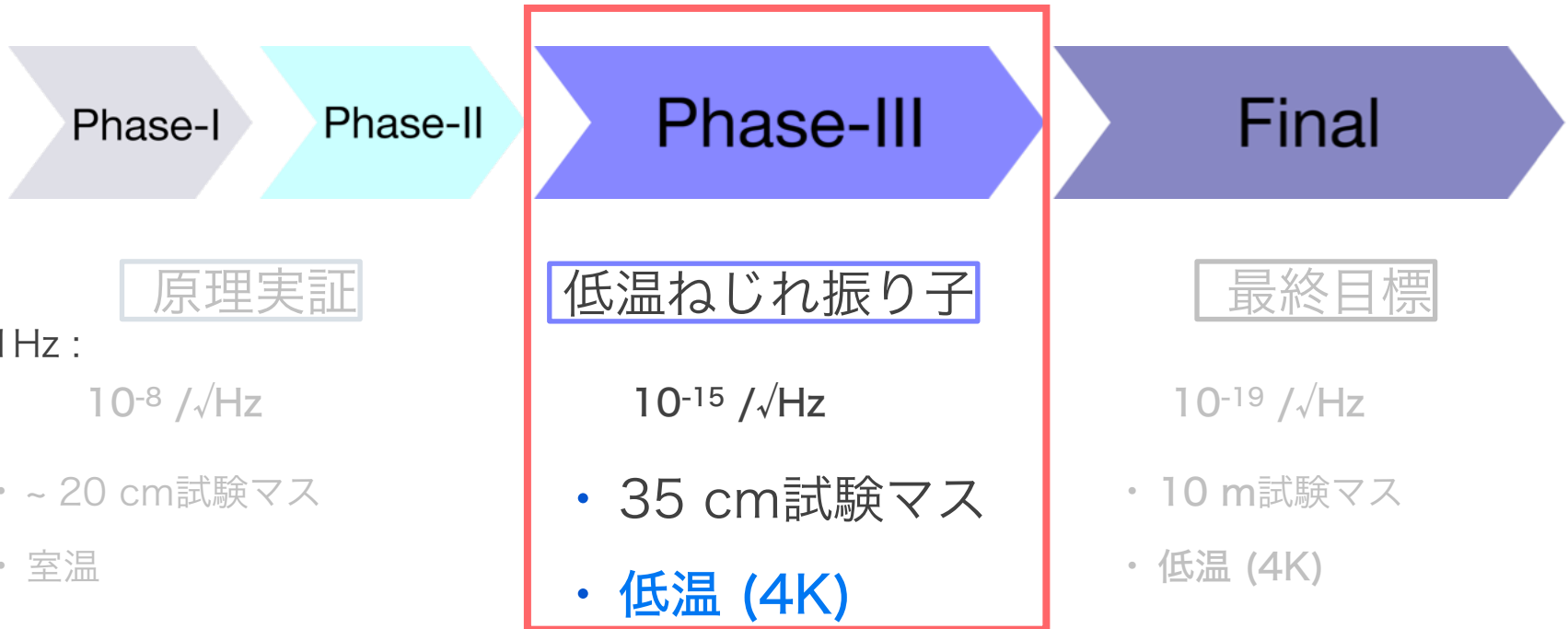
ねじれ振子型重力波望遠鏡TOBA

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 → 0.1-10Hzの低周波重力波の地上観測が可能
- 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 $h \sim 10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$



研究計画



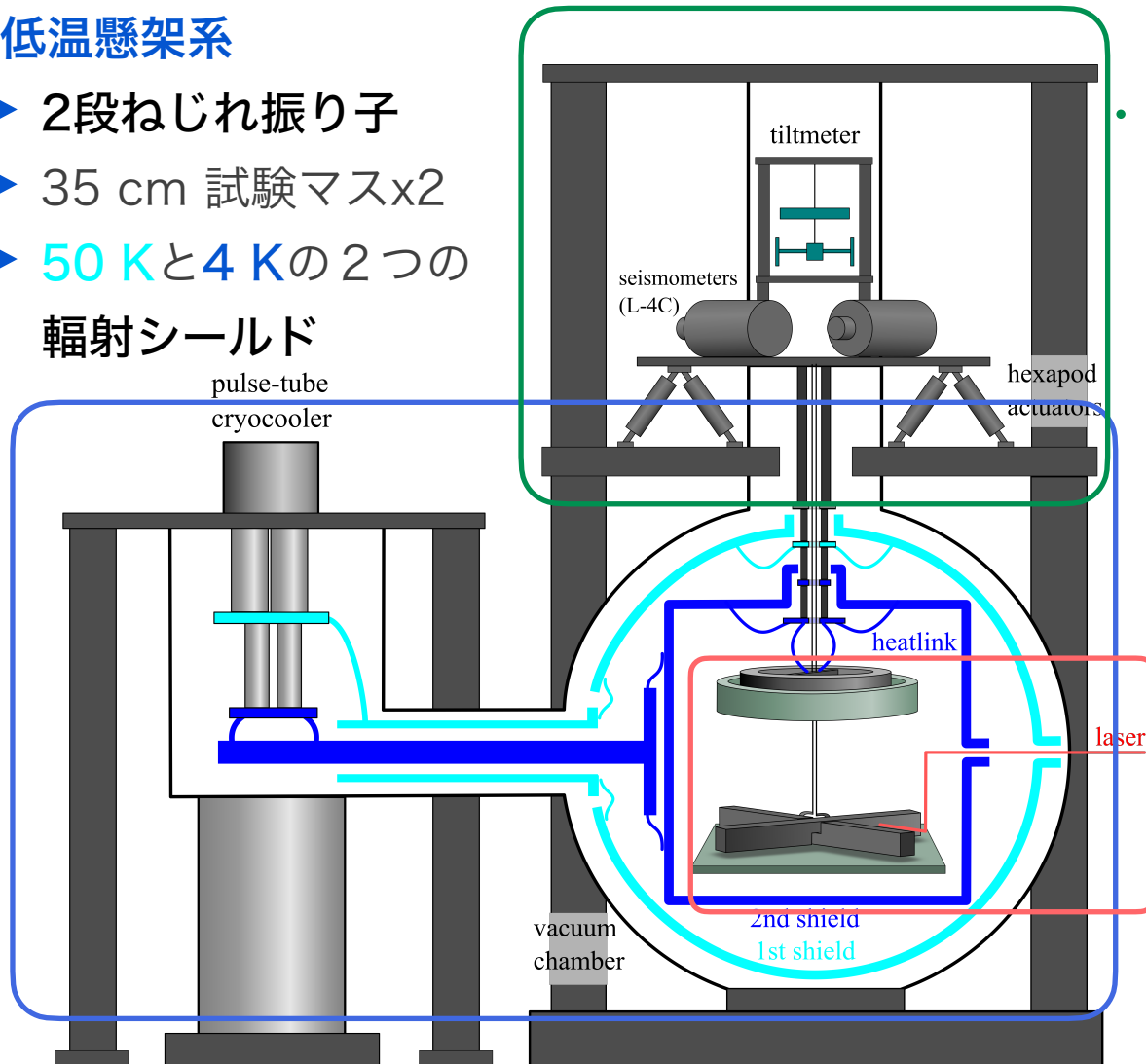
現在: Phase-III TOBAの開発

- 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

- 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
輻射シールド



- 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

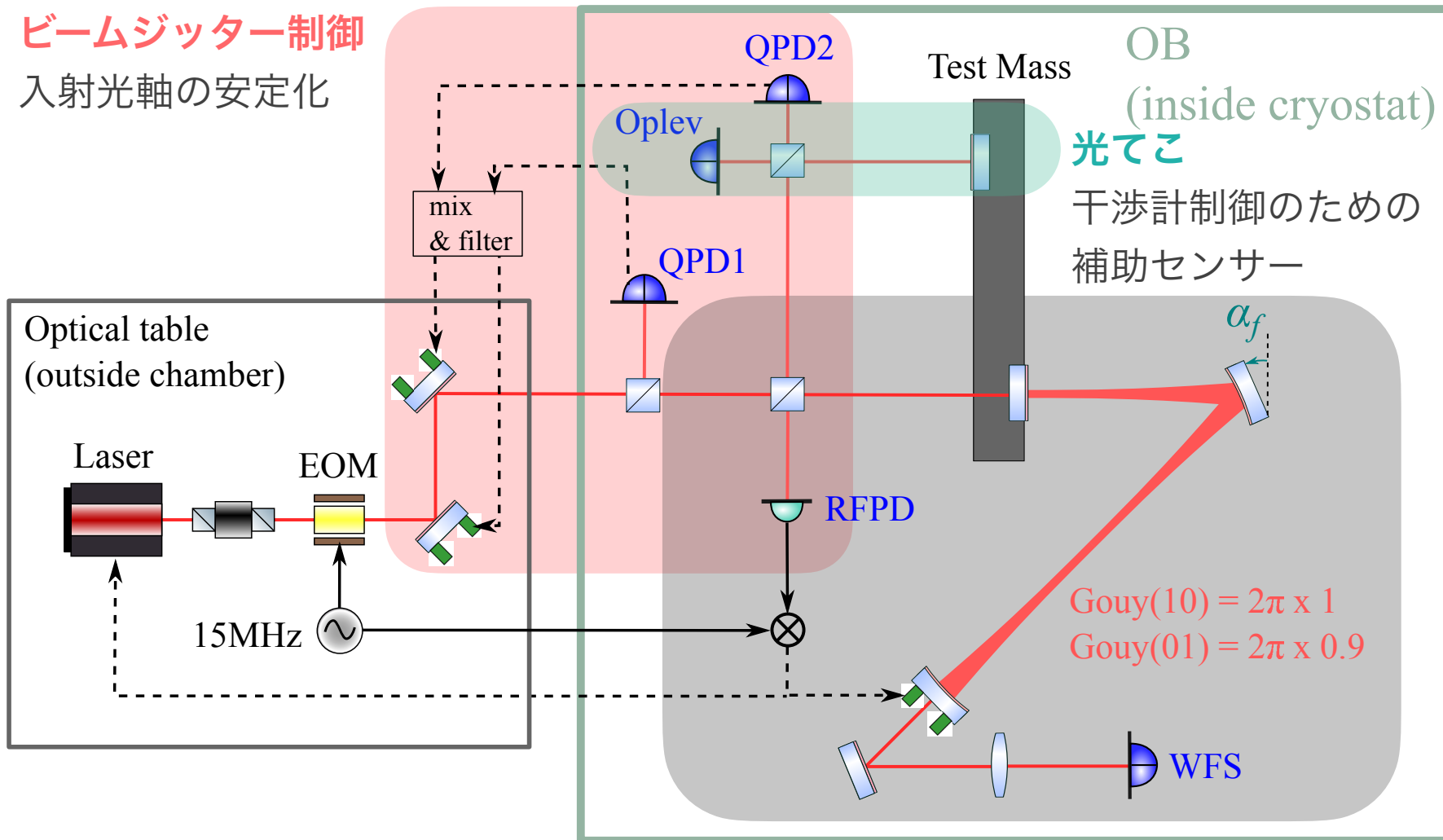
- 光学系

- ▶ 改良型WFS

光学系構成

ビームジッター制御

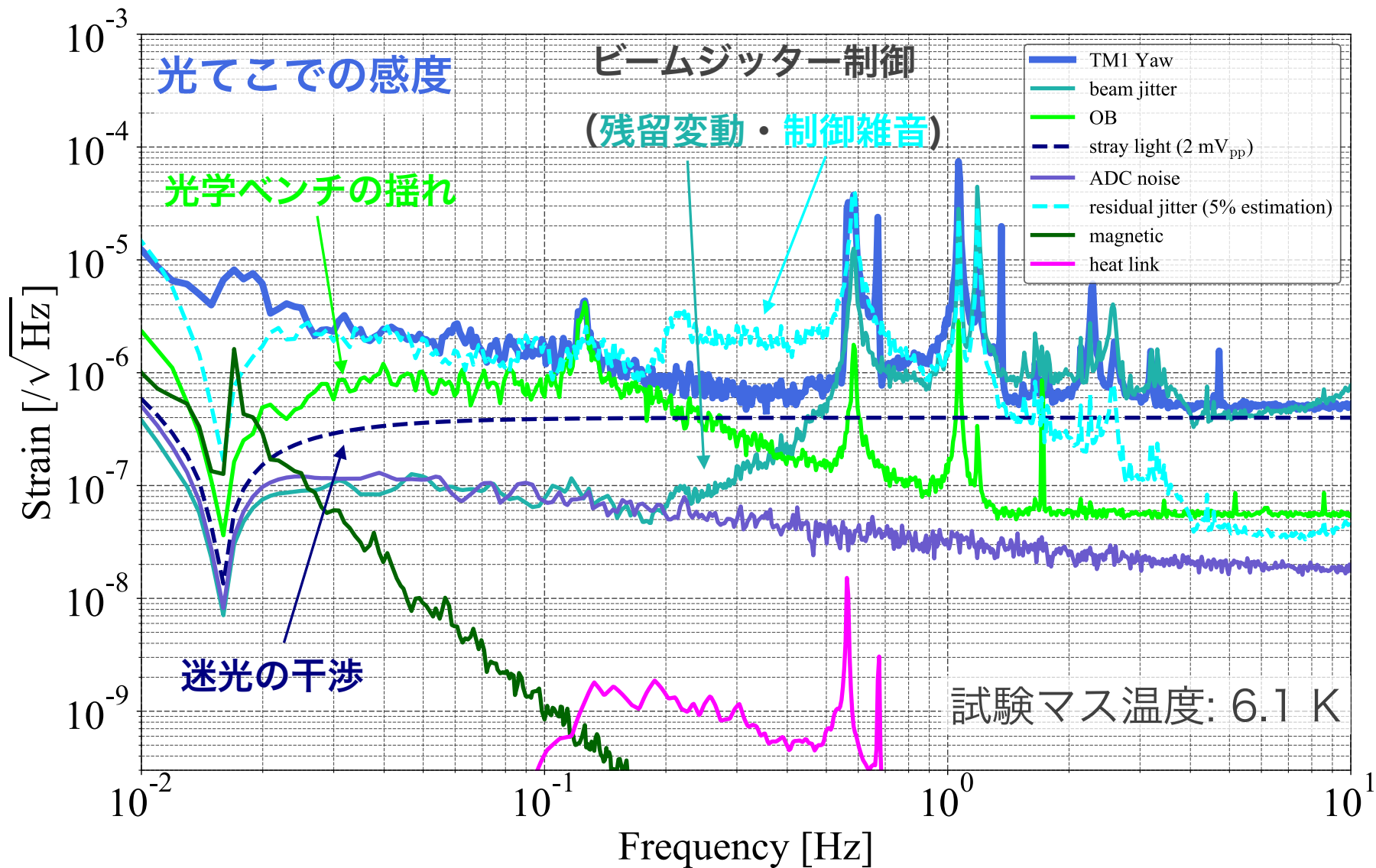
入射光軸の安定化



改良型WFS

散射雑音の低減 (未実証)

現在の感度



光学系の問題

- 懸架された光学ベンチへ真空槽外から空間光レーザーを入射

- 入射光軸の制御が必要

- ▶ 光学ベンチの制御

- 地面振動を導入

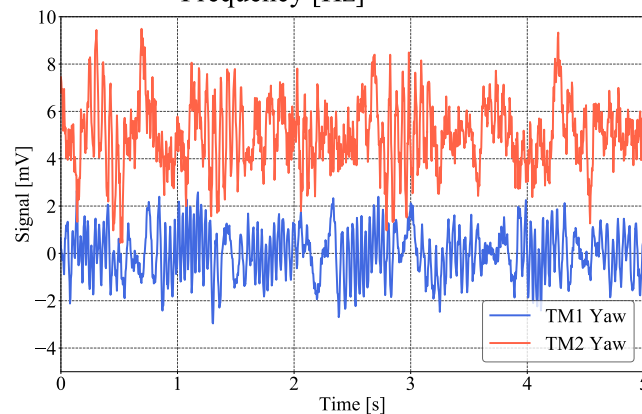
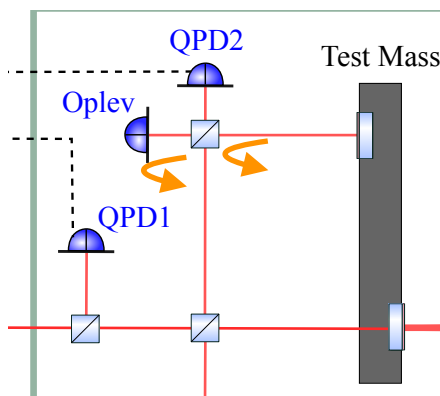
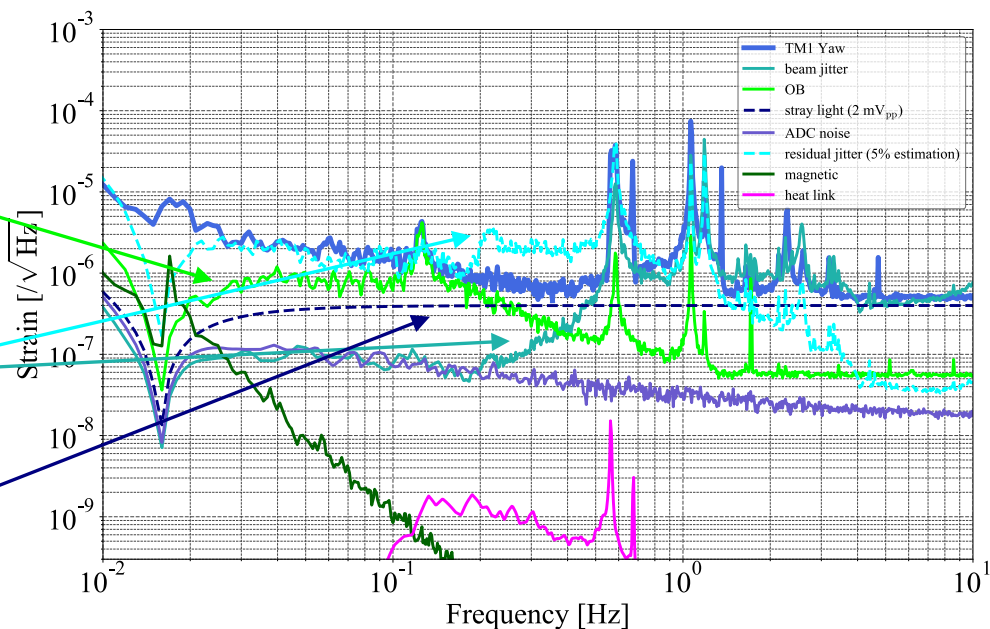
- ▶ ビームスポットの制御

- 強度雑音などとカップル

- BS表面での反射

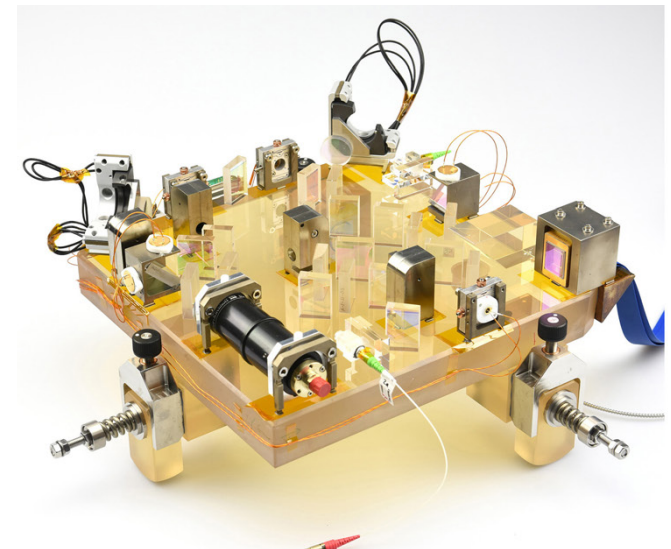
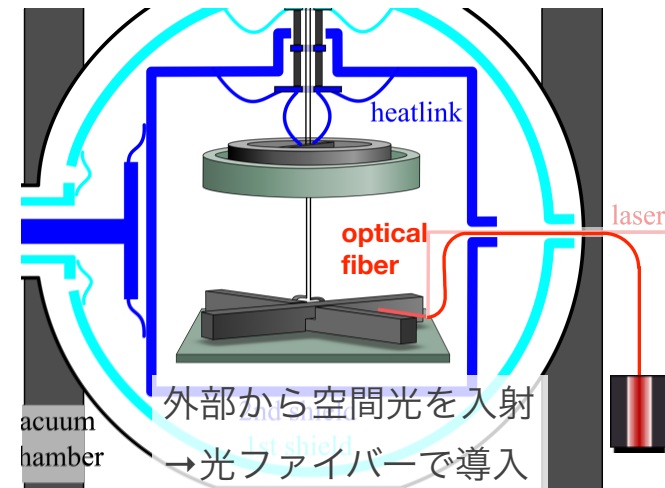
- ▶ 迷光が干渉

改良が必要



光学系改良

- 入射光の変更
 - ◉ 雑音の多くは空間光で真空槽内に入射していたことに起因
 - ◉ 空間光 → 光ファイバーに変更
- モノリシック光学系の導入
 - ◉ ジッターの低減
- 干渉計方式の見直し
 - ◉ 経験の浅い改良型WFS
 - ◉ 慣れた干渉計 (Michelson, Fabry-Perot, ...)



[Chwalla et. al. \(2016\)](#)



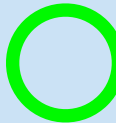













モノリシック光学系の開発

- 基盤に光学素子を直接貼り付ける
 - ◎ 熱膨張・光学素子の振動などに強い
 - ◎ 取り付け後の調整は不可能

- 低熱膨張ガラスの基盤 + 熔融石英の光学素子が一般的
 - ◎ 熔融石英は低温での性質が悪い
 - ▶ **シリコン基盤 + シリコン光学素子**で構築

- 固定鏡を用いて、低温モノリシック光学系の構築手法の確立と目標感度実現を目指す

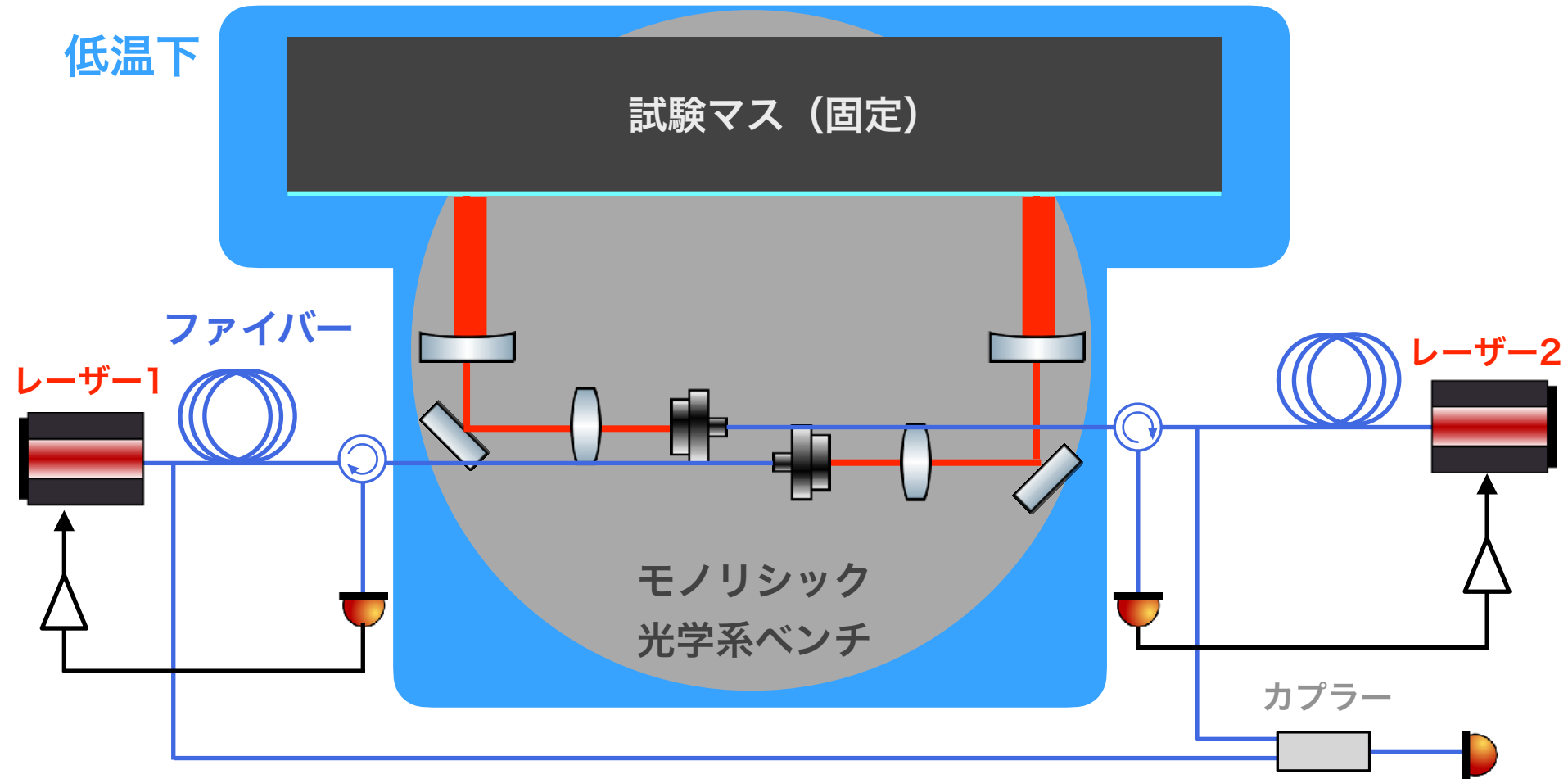
干渉計構成

	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

光学系デザイン

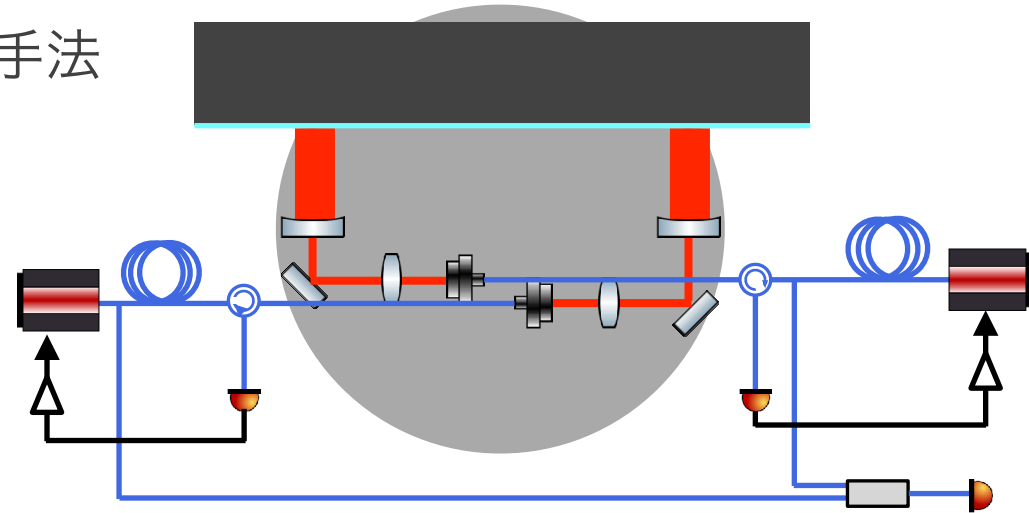
低温下



- 2台のレーザーで各腕を制御
- 差動変動 (=ねじれ回転) は周波数差から読み取る

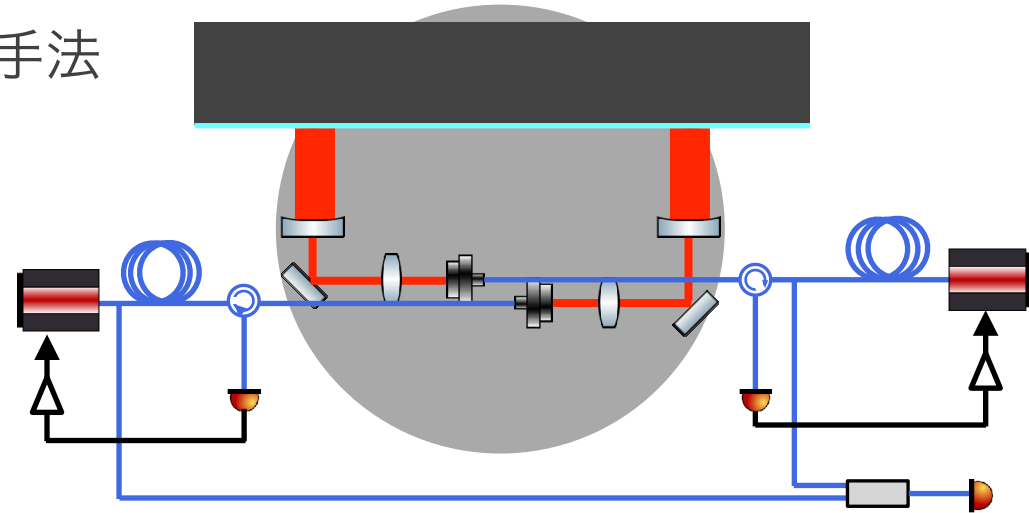
開発項目

- 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
 - ▶ **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/ $\sqrt{\text{Hz}}$**



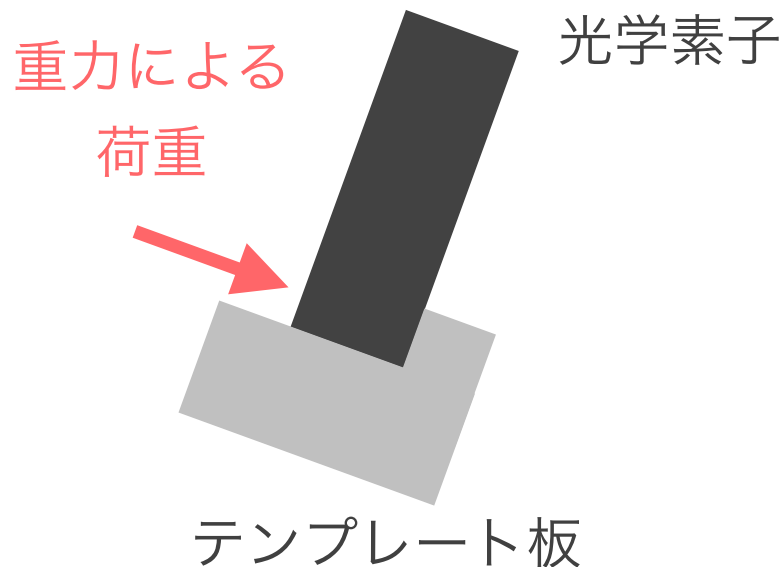
アラインメント手法

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
 - ◎ テンプレートを用いてアラインメント
- 共振器を構成する鏡 → 精度高め
 - ◎ 精度高め
 - ◎ 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

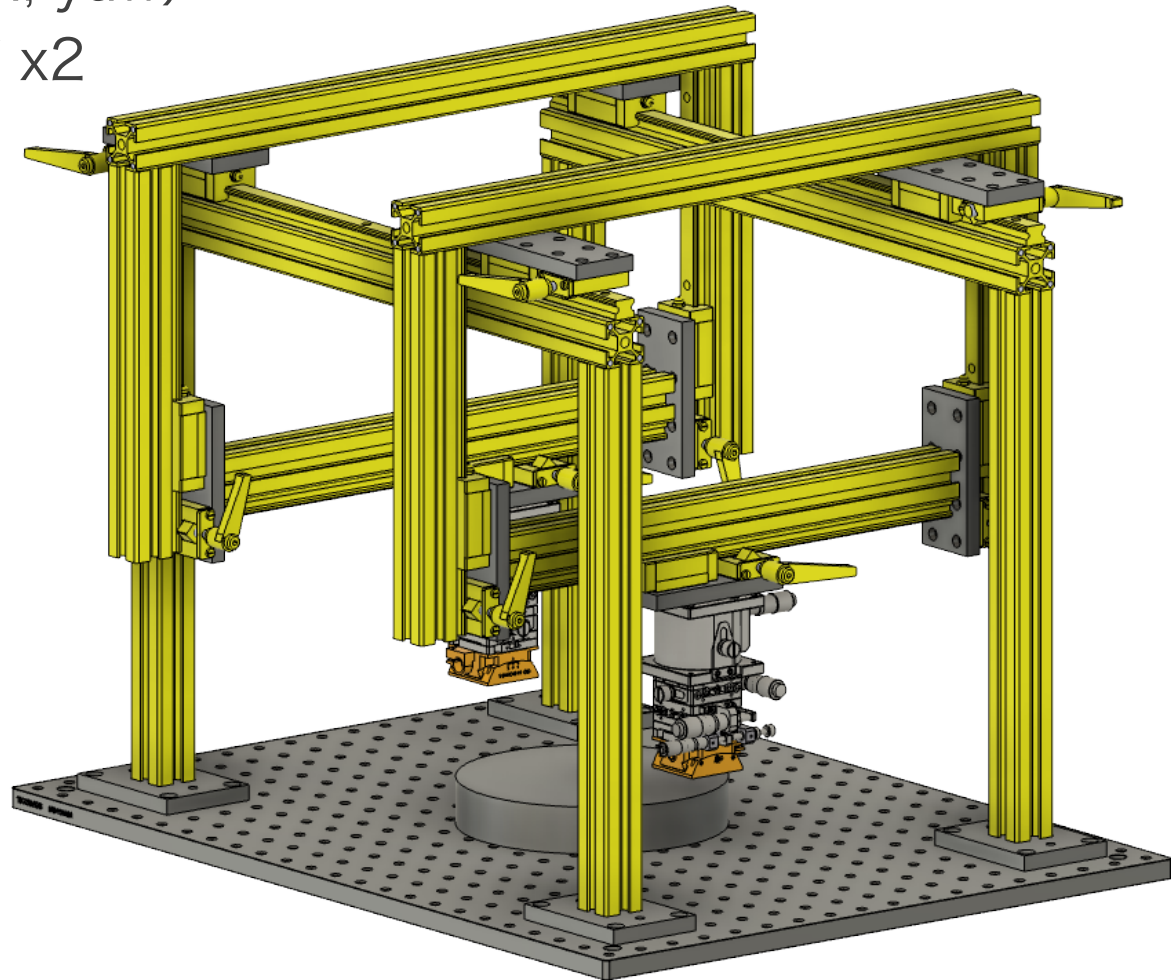
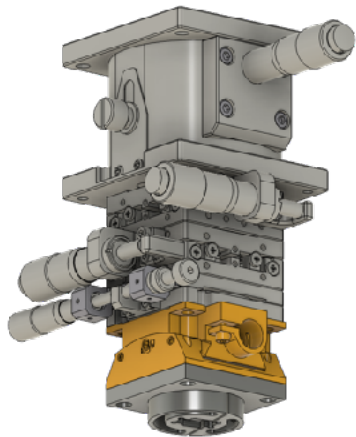


- 現在はテンプレートを設計中

- 材質：アルミ
- 接着剤：Stycast 1260

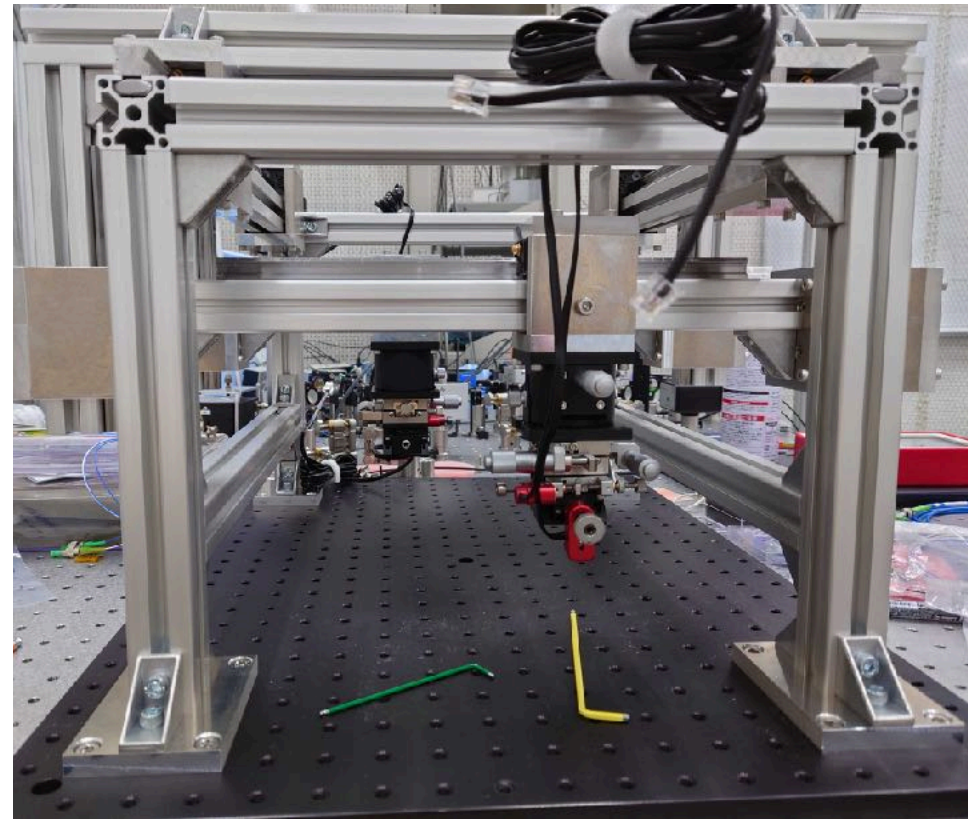
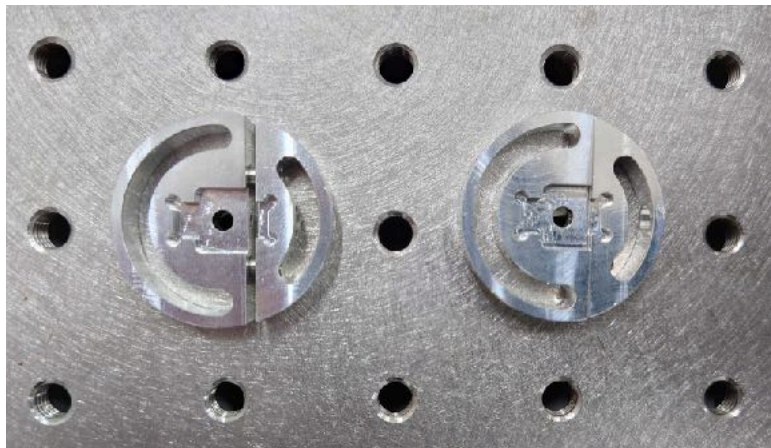
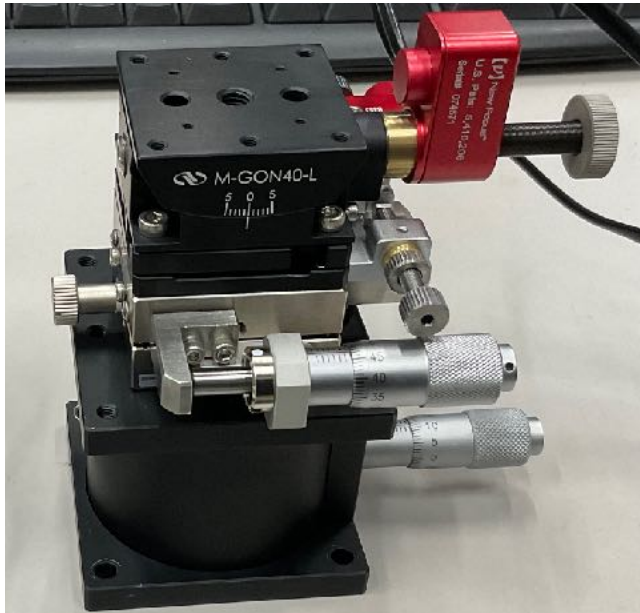
ステージを用いた微調整

- 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

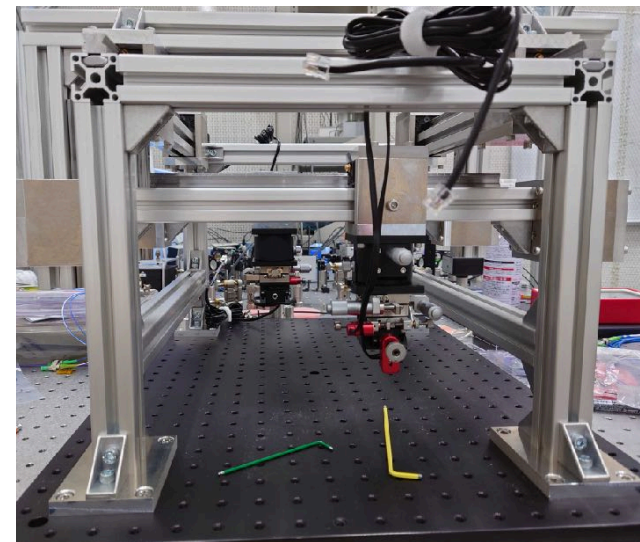
- ・ ダミー光学系を用いて動作確認



何らかの図が入る

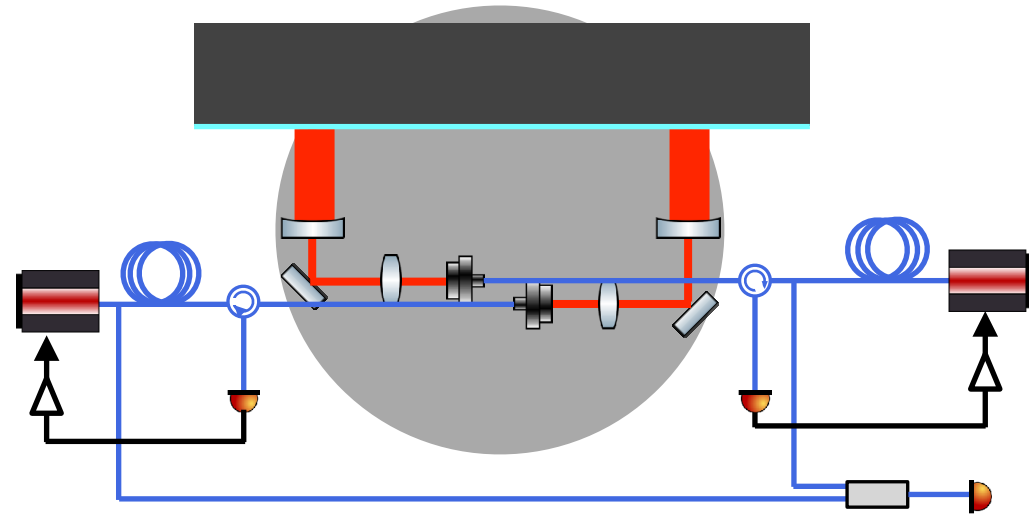
まとめ、今後の展望

- 低周波重力勾配測定に向けてPhase-III TOBAの開発
- 高感度化に向けた光学系の改良案
 - ◎ 光ファイバー + モノリシック光学系
- アライメント手法の設計
 - ◎ 低精度：テンプレートを用いたアライメント
 - ▶ テンプレートを設計中
 - ◎ 高精度：ステージを用いたアライメント
 - ▶ 調整ステージを構築
 - ▶ 動作確認



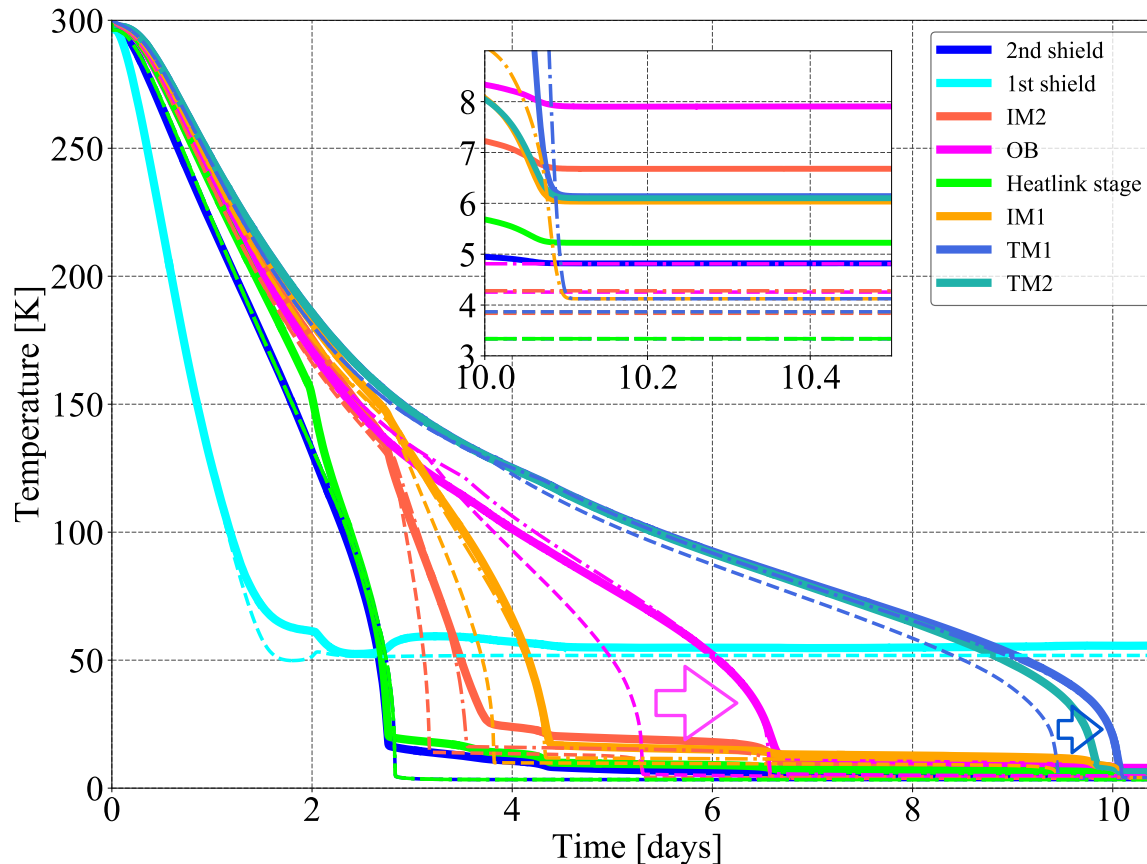
今後の展望

- モノリシック光学系の構築
 - ◎ 主要な光学系は入手済み
 - ◎ テンプレートの制作
 - ◎ 光学系の構築
- 性能試験（常温）
 - ◎ アライメントの安定度
 - ◎ 感度測定
- 性能試験（低温）
 - ◎ 4 Kまで冷却
 - ◎ 感度 10^{-16} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す

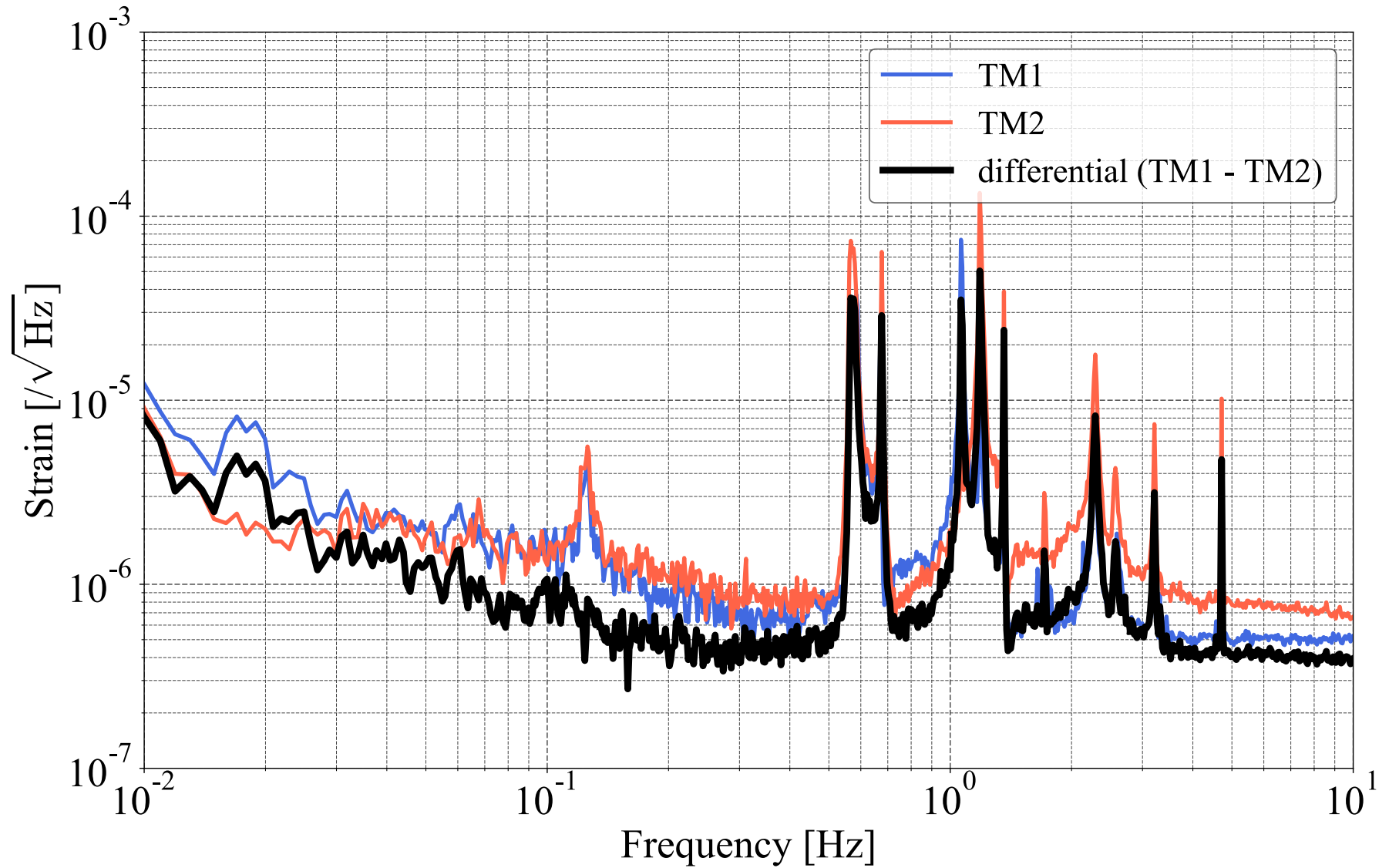


冷却結果

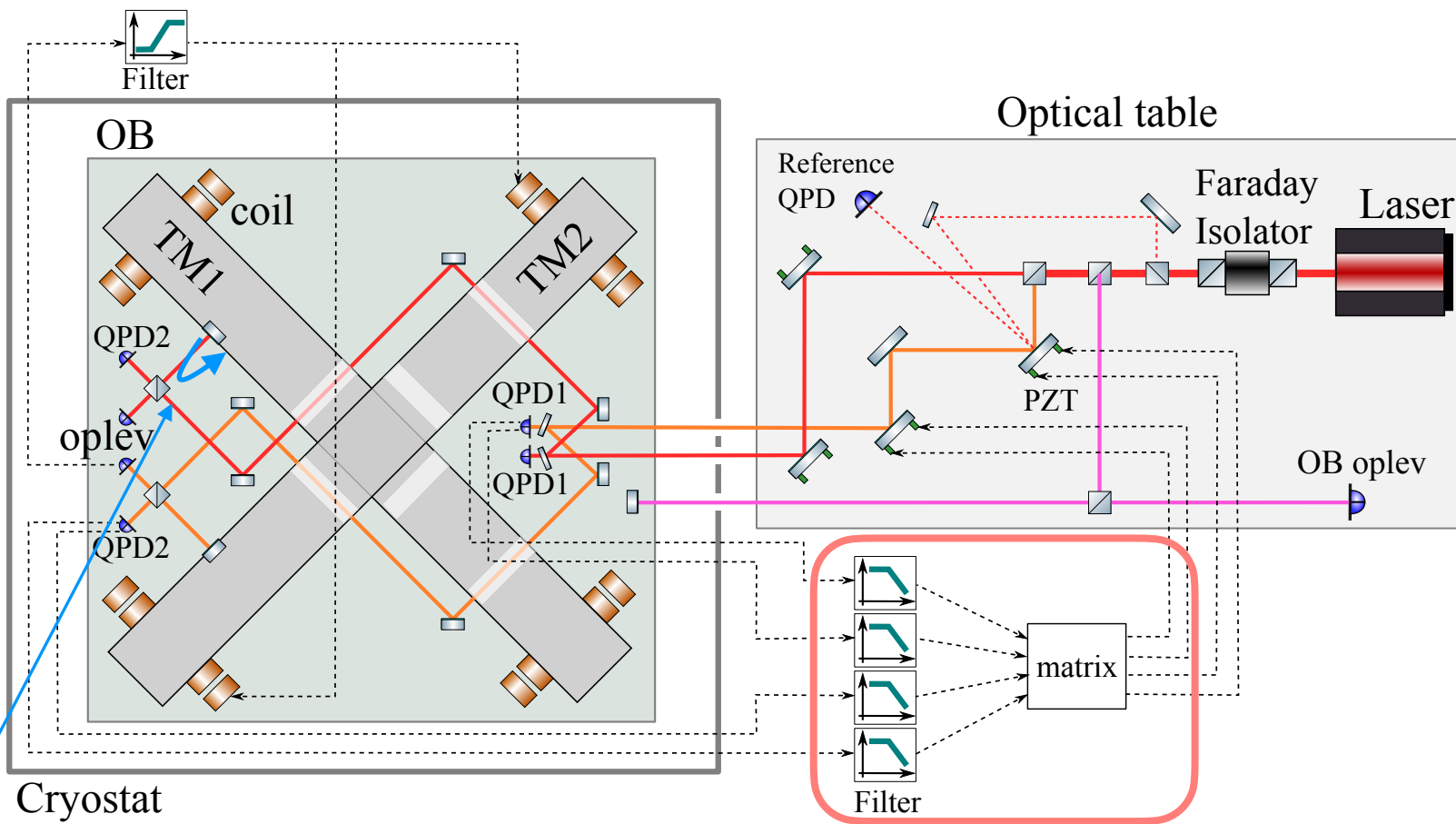
- 6.1 Kまでの冷却に成功 (4 Kの場合より1.2倍の熱雑音)
- 理論よりも冷却速度が遅い
- ▶ ヒートリンクの熱接触が想定よりも悪い



現在の感度



ビームジッター，迷光



迷光雑音：

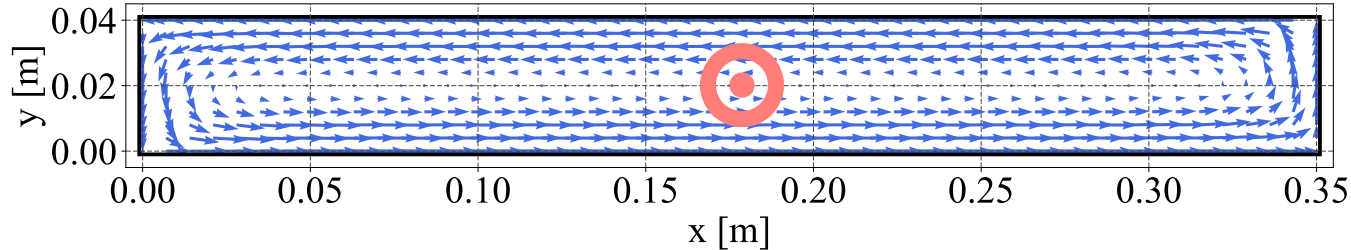
BSの表面反射などによる迷光が計測信号と干渉し，強度変動を起こす雑音

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

低温試験

シリコン同士を

- Stycast 1266
- DP190

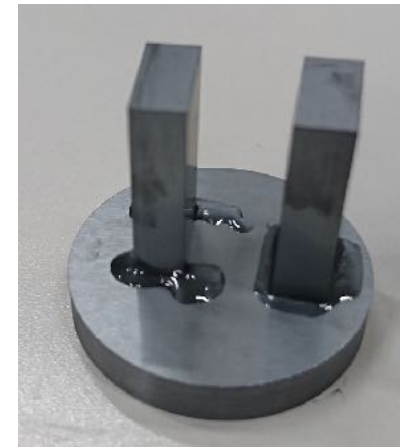
エポキシ

- NOA63
- NOA81

紫外線硬化樹脂



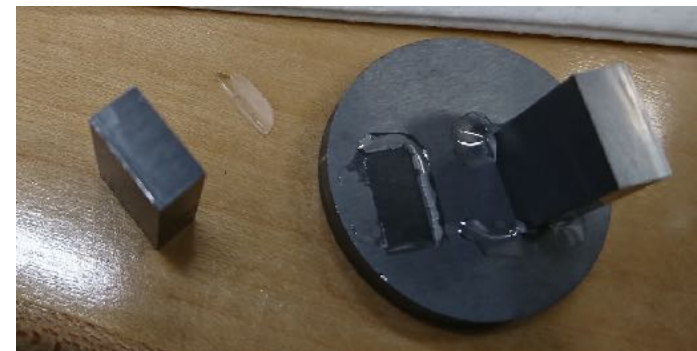
冷却&
昇温後



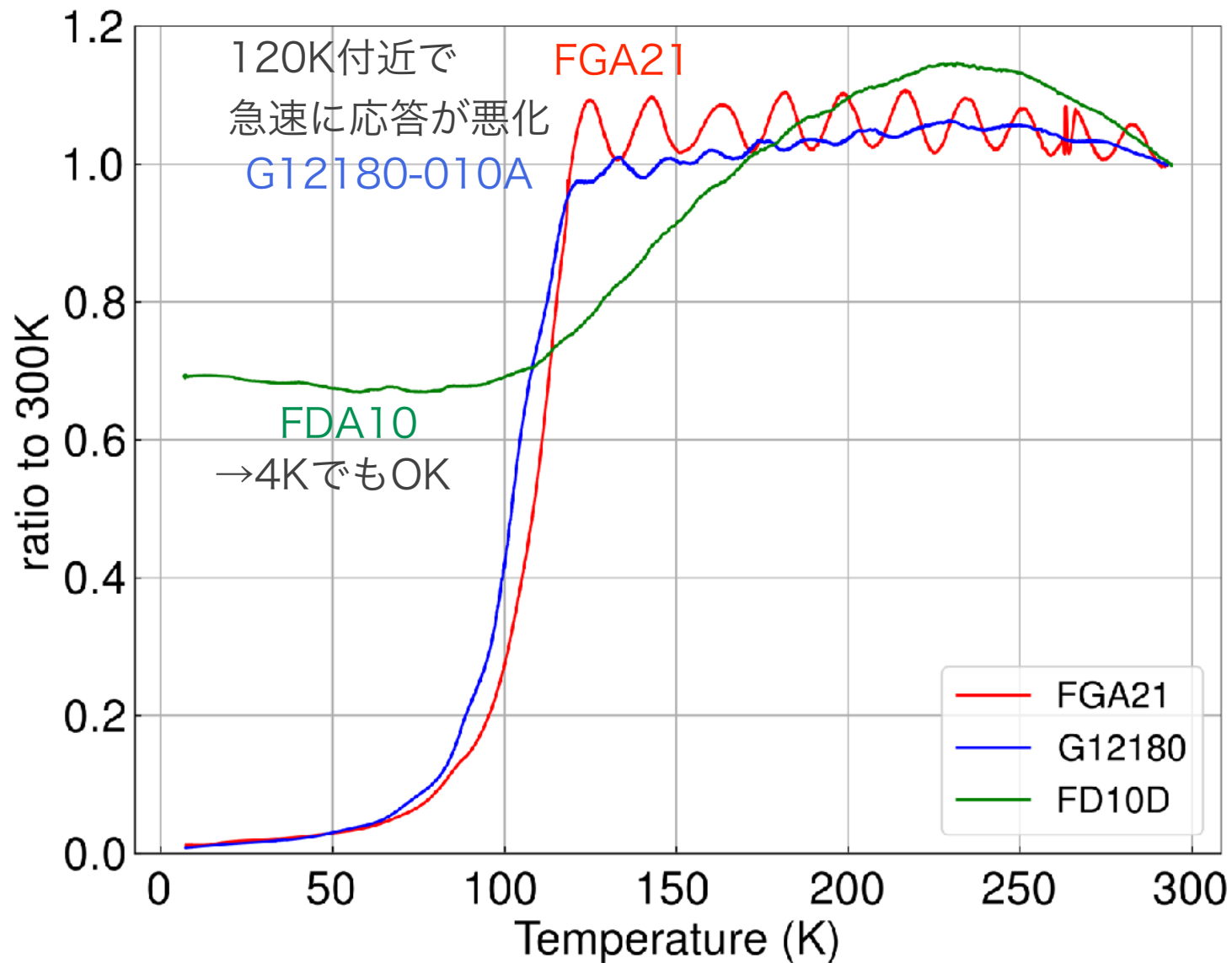
で接着し，4Kまで冷却

- ▶ 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



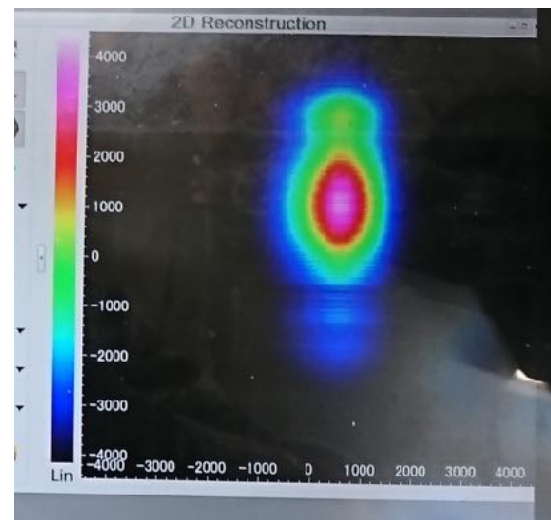
フォトダイオード



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