

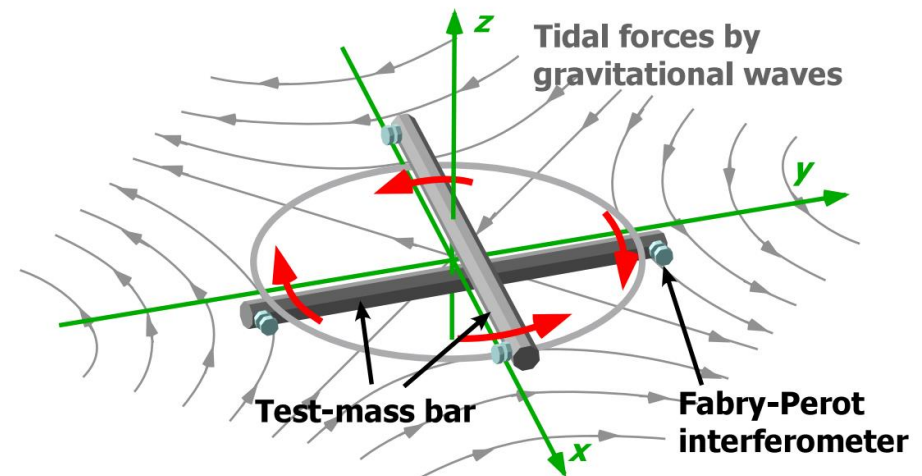
ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(41) : ねじれ振り子と読み取り光学系の開発

大島 由佳^A, 高野 哲^A, Ooi Ching Pin^A, Cao Mengdi^B,
道村 唯太^{C, D}, 小森 健太郎^D, 安東 正樹^{A, D}
+ Perry Forsyth^A

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

概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA で 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- プロトタイプ Phase-III TOBA を開発中
 - ねじれ振り子の冷却試験は完了
 - 感度を追求する段階
- 過去のプロトタイプで得られた知見をもとに設計を行った
 - 懸架系
 - 読み取り光学系



目次

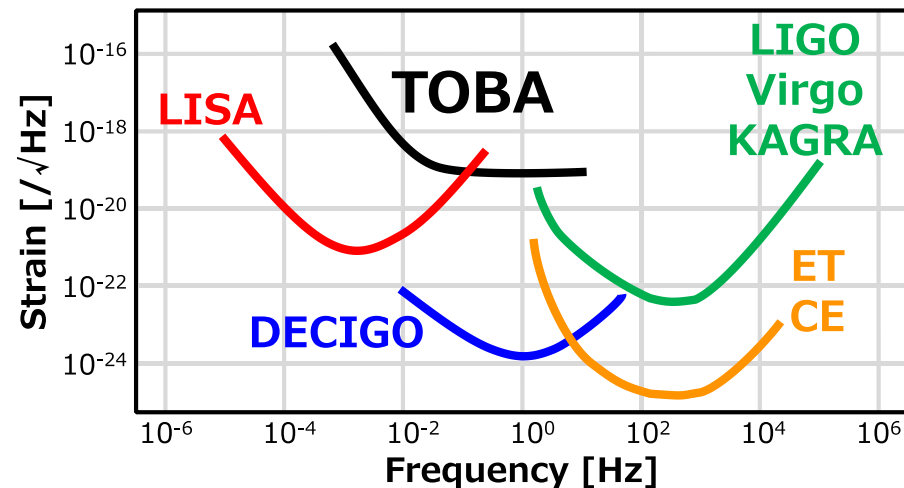
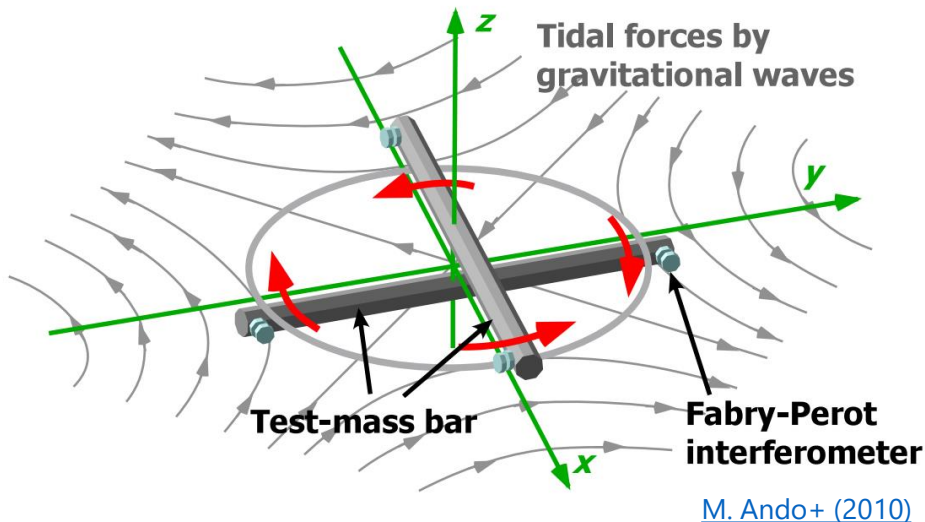
- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
 - 原理
 - サイエンス
 - 開発の流れ
- プロトタイプ Phase-III TOBA
 - 構成
 - 目標感度
 - 現状・開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 目的・構成
 - 目標感度・要求値
 - 懸架系
 - 光学系

目次

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
 - 原理
 - サイエンス
 - 開発の流れ
- プロトタイプ Phase-III TOBA
 - 構成
 - 目標感度
 - 現状・開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 目的・構成
 - 目標感度・要求値
 - 懸架系
 - 光学系

ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA

- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスで潮汐力によるねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い (~ 1 mHz)
 - 地上で低周波数に高感度
- 宇宙打ち上げの技術開発・コストが抑えられる
- 地上にあるためメンテナンスが簡単
- 地上にあるため地球物理のサイエンスも得られる

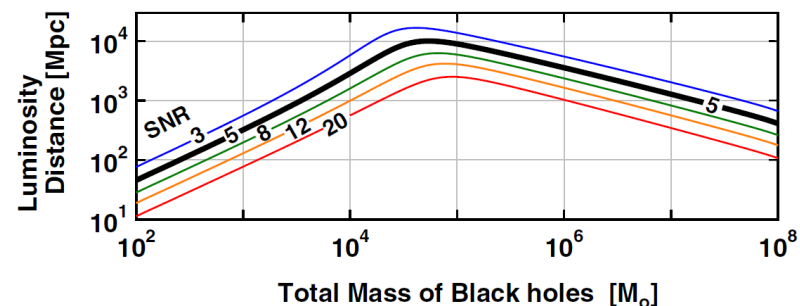


TOBA で得られるサイエンス (1)

低周波の重力波観測

- 中間質量ブラックホール連星合体
 - ~ 1 Mpc 以内 (銀河系内) (Phase-III)
 - ~ 10 Gpc 以内 (宇宙全体) (Final)→ 大質量ブラックホール形成過程の解明

- 背景重力波
 - $\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$ (Final)→ 初期宇宙の直接探査

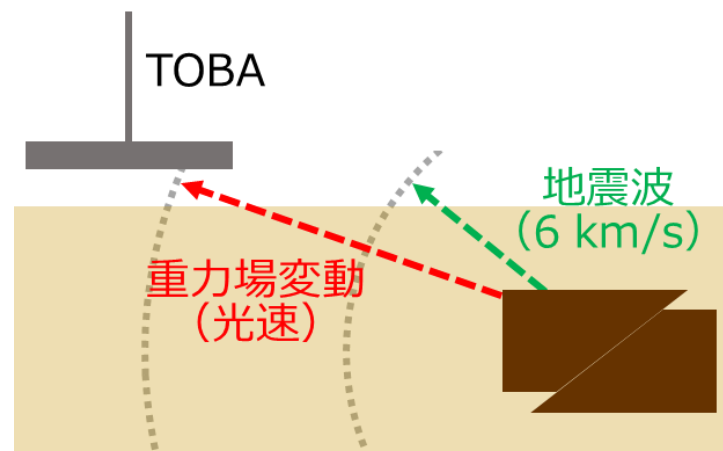
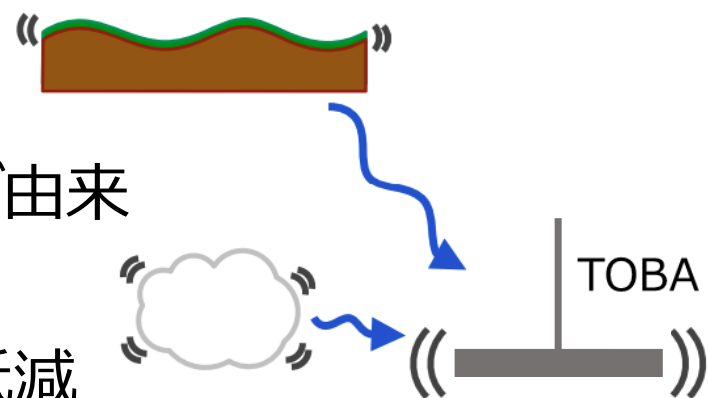


[M. Ando+ \(2010\)](#)

TOBA で得られるサイエンス (2)

地球物理の観測

- 重力勾配雑音: 大気や地面の揺らぎ由来
 - 初の直接検出 (Phase-III)
 - 第3世代重力波望遠鏡の雑音低減
- より早い地震速報
 - 100 km 先の M7 の地震を 10 秒以内 (Phase-III)
 - 災害被害の軽減



TOBA 開発の流れ・目標感度

Phase-I

Phase-II

現在

Phase-III

Final

原理実証

要素開発・雑音低減
地球物理の観測

重力波観測

$10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
(達成)

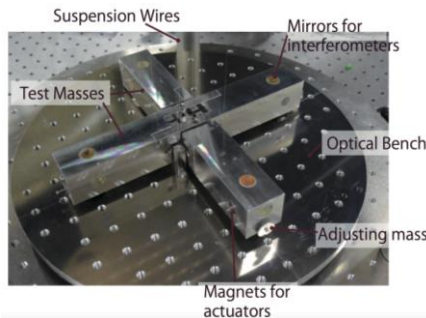
$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
(目標)

$10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
(目標)

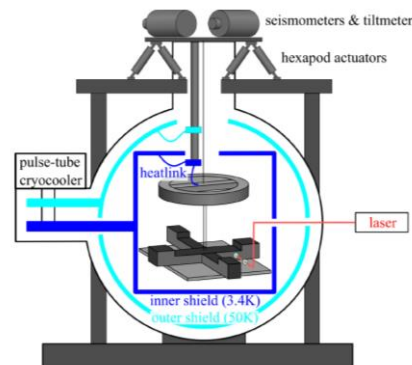
20 cm テストマス
常温

35 cm テストマス
低温 (4 K)

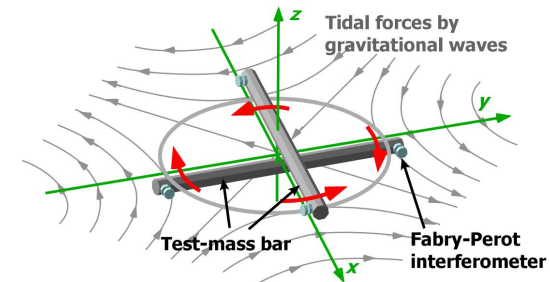
10 m テストマス
低温 (4 K)



[K. Ishidoshiro+ \(2011\)](#)
[A. Shoda+ \(2017\)](#)



[T. Shimoda+ \(2020\)](#)



目次

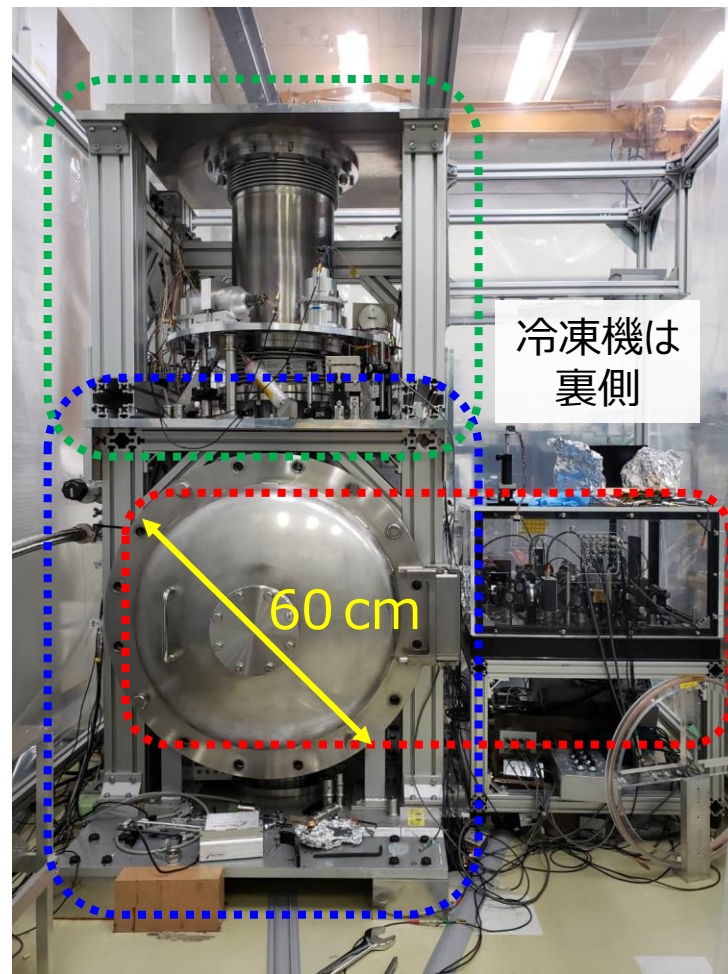
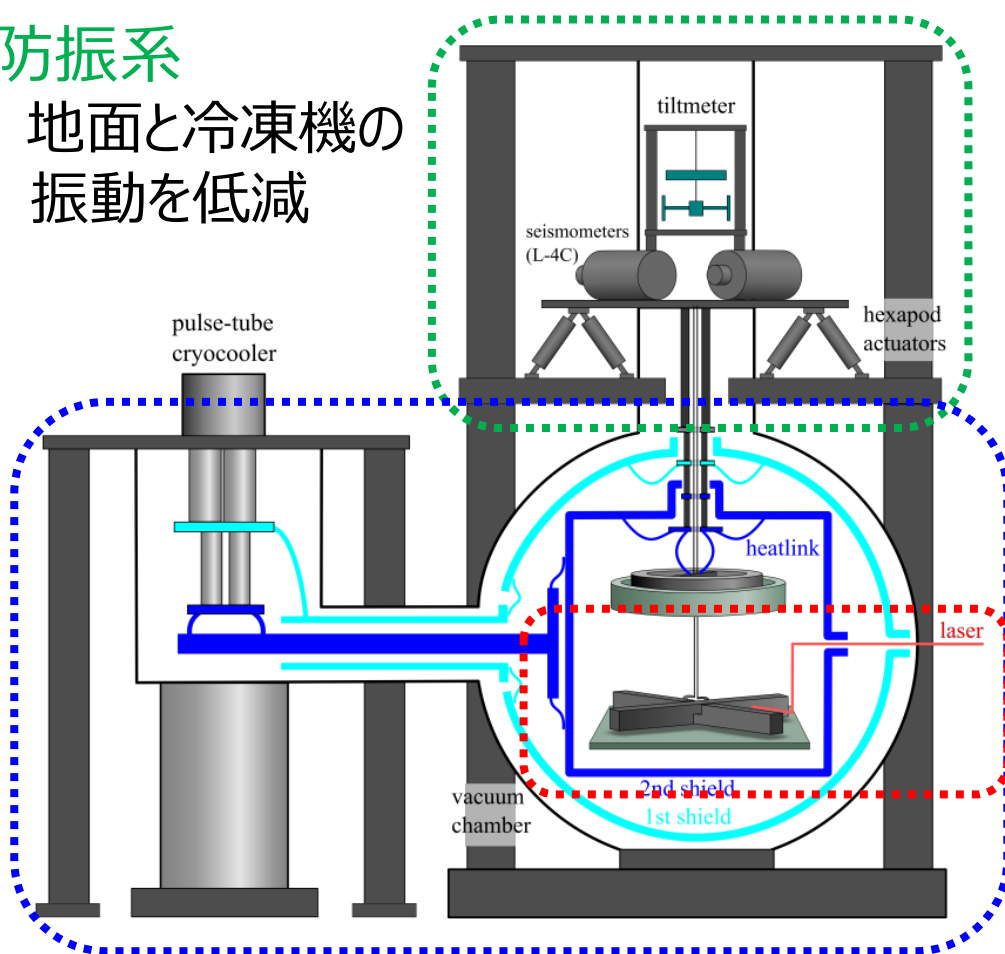
- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
 - 原理
 - サイエンス
 - 開発の流れ
- プロトタイプ Phase-III TOBA
 - 構成
 - 目標感度
 - 現状・開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 目的・構成
 - 目標感度・要求値
 - 懸架系
 - 光学系

Phase-III TOBAの構成

下田智文 博士論文 (2019)

防振系

地面と冷凍機の振動を低減



冷凍機は裏側

60 cm

低温懸架系

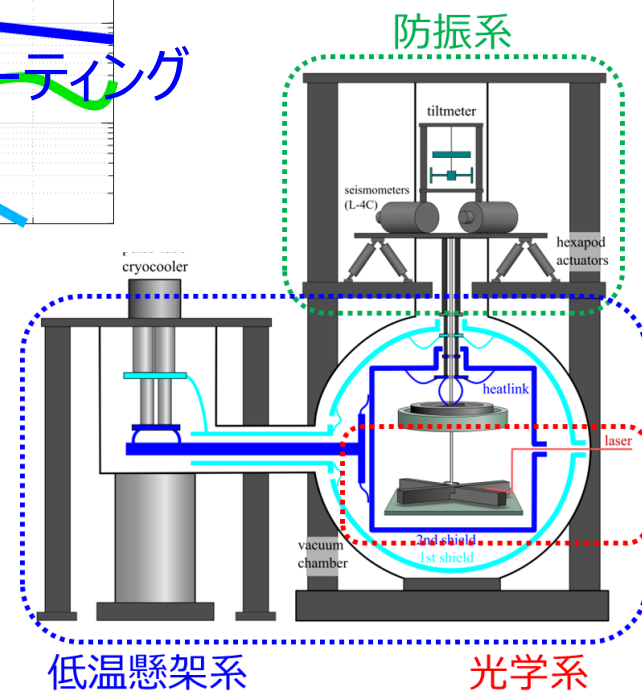
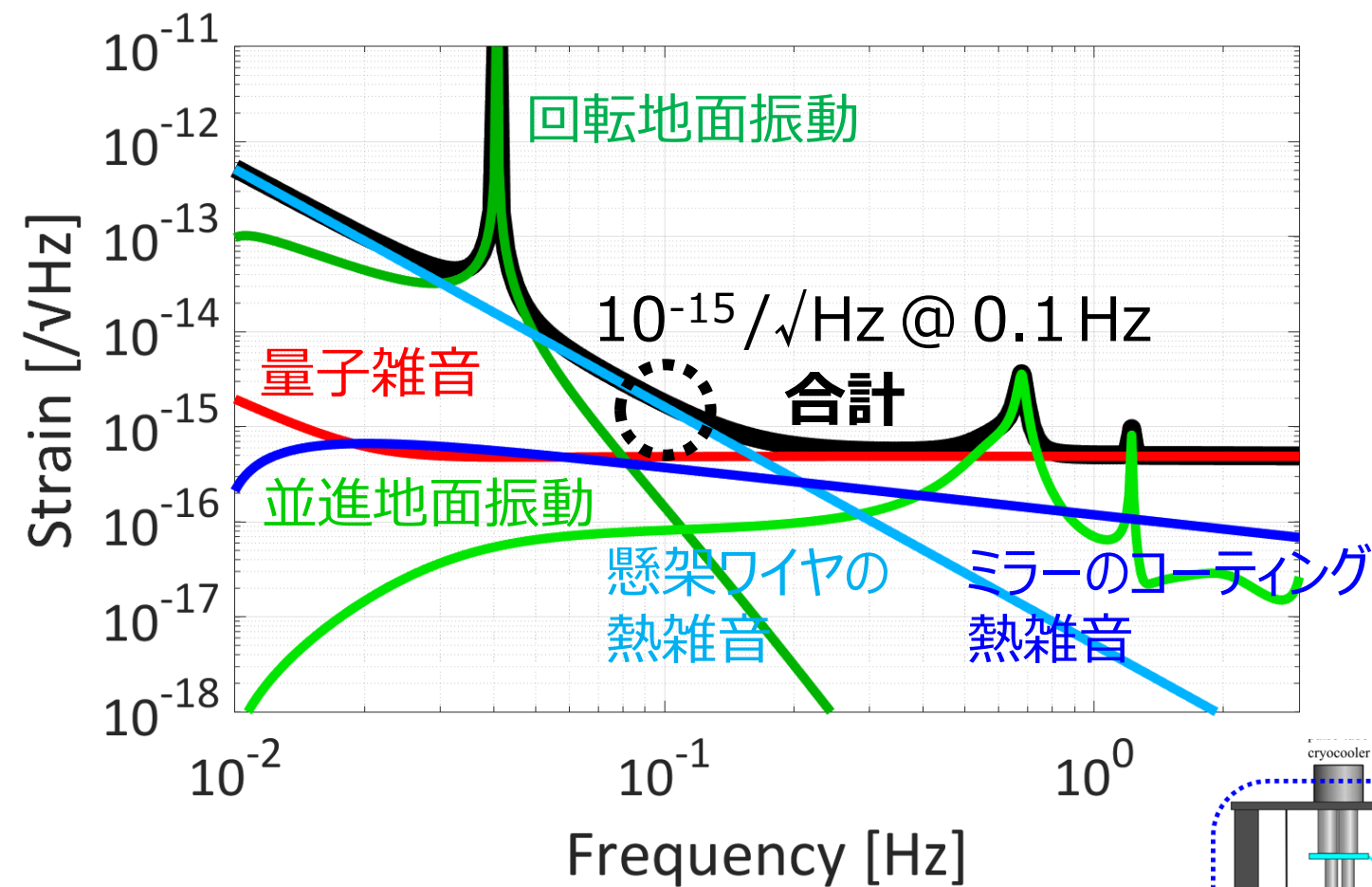
冷却されたねじれ振り子

光学系

ねじれ振り子の回転を読み取る

@東大 本郷キャンパス

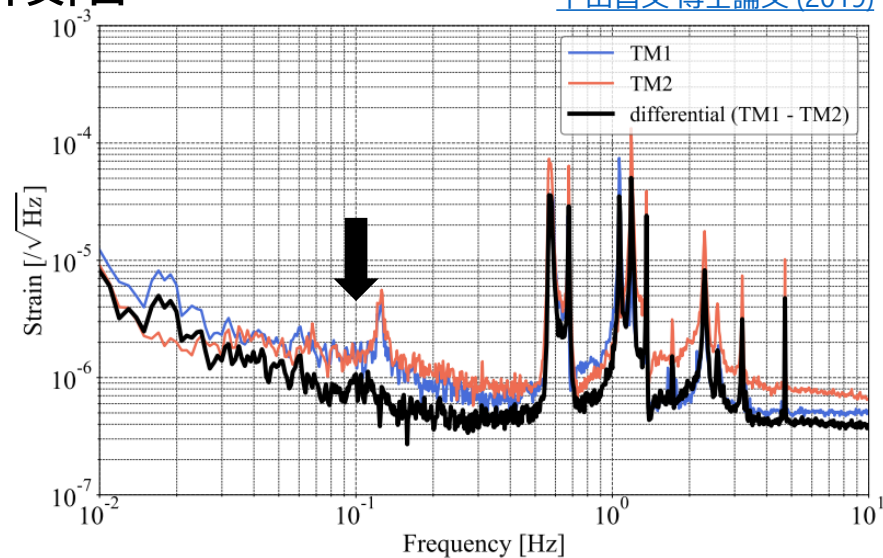
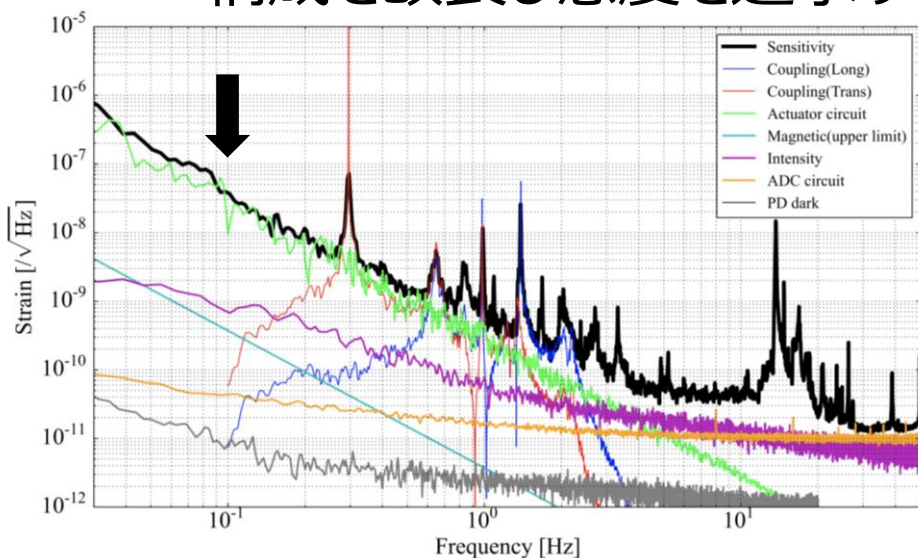
Phase-III TOBA の目標感度



Phase-III TOBA の現状

- 常温での達成感度: $4 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 読み取りはマイケルソン干渉計
 - カウンターウェイトによるテストマスの傾き調整
- 低温での達成感度: $7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 6 Kまでの冷却に成功
 - 読み取りは光てこ

→ 構成を改良し感度を追求する段階



下田智文 博士論文 (2019)

Phase-III TOBA の開発項目

- 18pT21-7 (本講演)
懸架系+光学系: ねじれ振り子と読み取りファブリペロー共振器
- 18pT21-8 (高野)
低温+光学系: 低温モノリシック光学系
- 18pT21-9 (Cao)
防振系: 能動防振系のための傾斜計
- 18pT21-10 (Ooi)
低温懸架系: 低温で高いQ値をもつ懸架ワイヤ

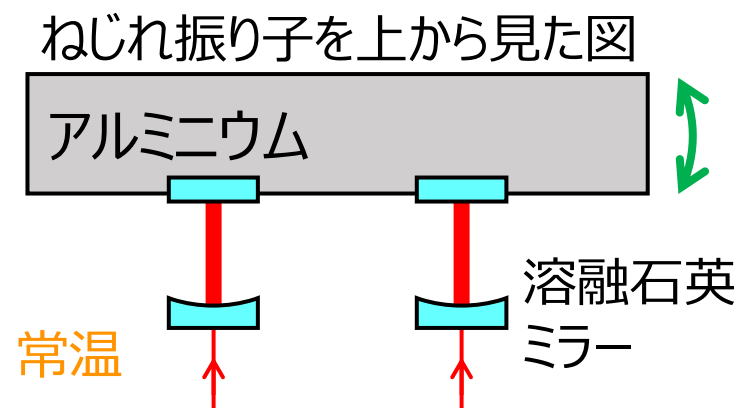
目次

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
 - 原理
 - サイエンス
 - 開発の流れ
- プロトタイプ Phase-III TOBA
 - 構成
 - 目標感度
 - 現状・開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 目的・構成
 - 目標感度・要求値
 - 懸架系
 - 光学系

実験の目的・構成

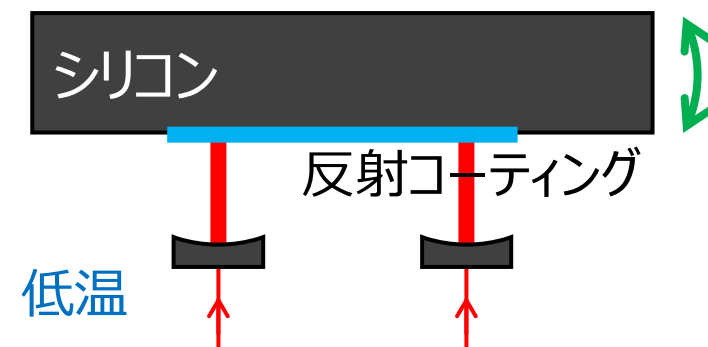
- 目的
 - ・ 差動ファブリペロー共振器での角度読み取りの実証
 - ・ シリコン製のねじれ振り子の製作
 - ・ 現在の状況で可能な最高感度を出す

第1段階 (今年度)



- ・ 設計の問題点の洗い出し
- ・ 共振器ロックの実証

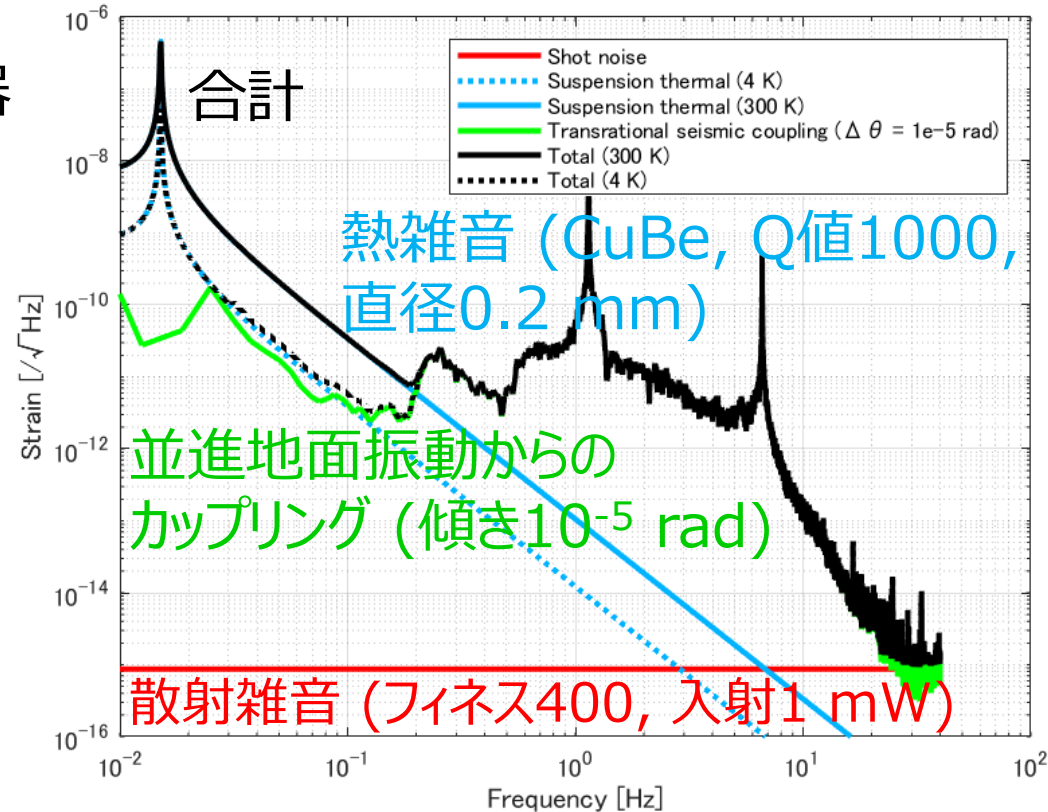
第2段階 (来年度)



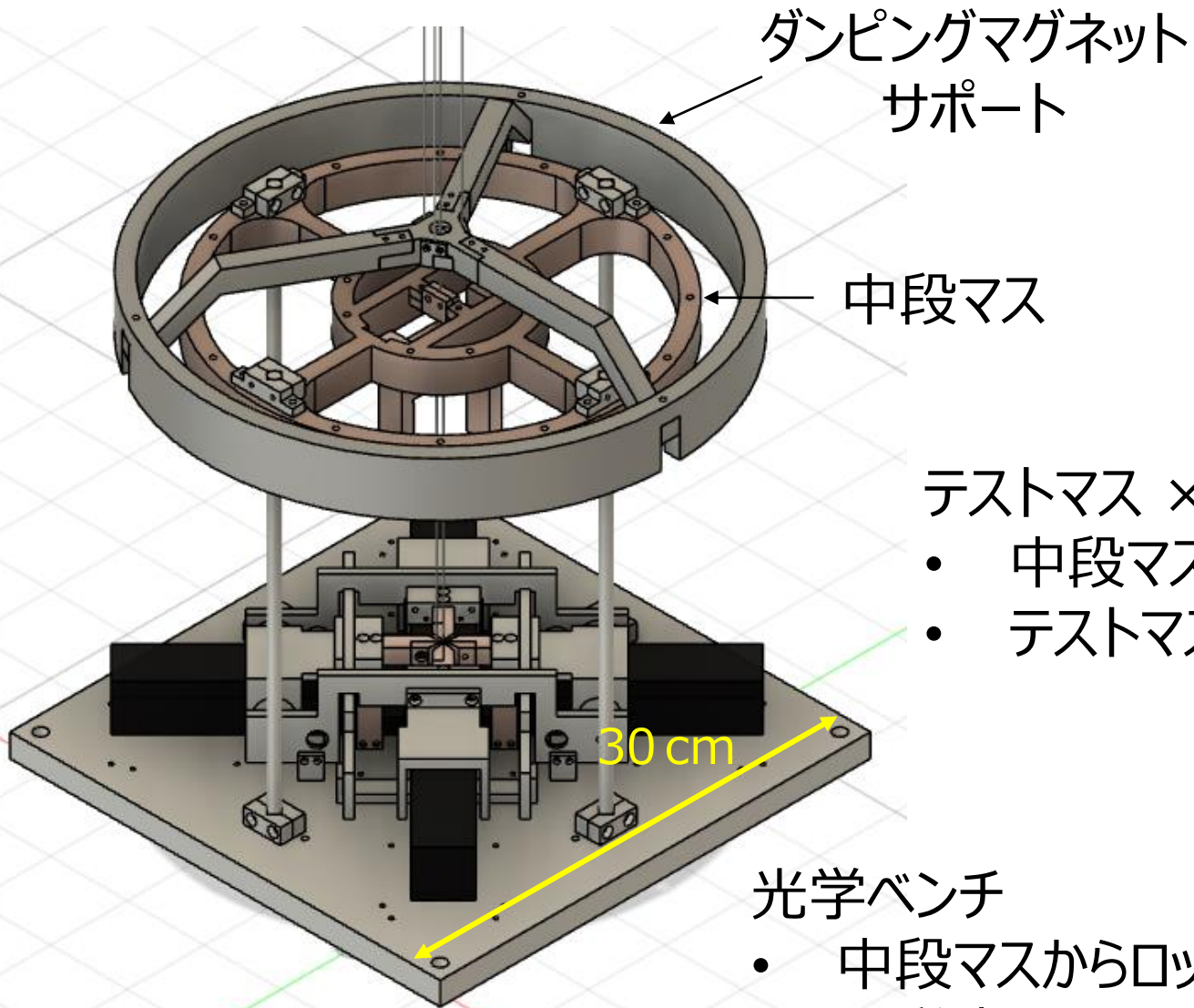
- ・ 目標感度の達成

目標感度・要求値

- 目標感度: $6 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$
 - 懸架ワイヤの熱雑音リミット・常温→低温での感度向上
- 要求値
 - ねじれの共振周波数 $< 0.1 \text{ Hz}$: テストマス・懸架ワイヤの設計
 - 並進地面振動からのカップリング雑音 $<$ 熱雑音: テストマス傾き
 - 散射雑音 $<$ 熱雑音:
ファブリペロー共振器



懸架系の設計



ダンピングマグネット
サポート

中段マス

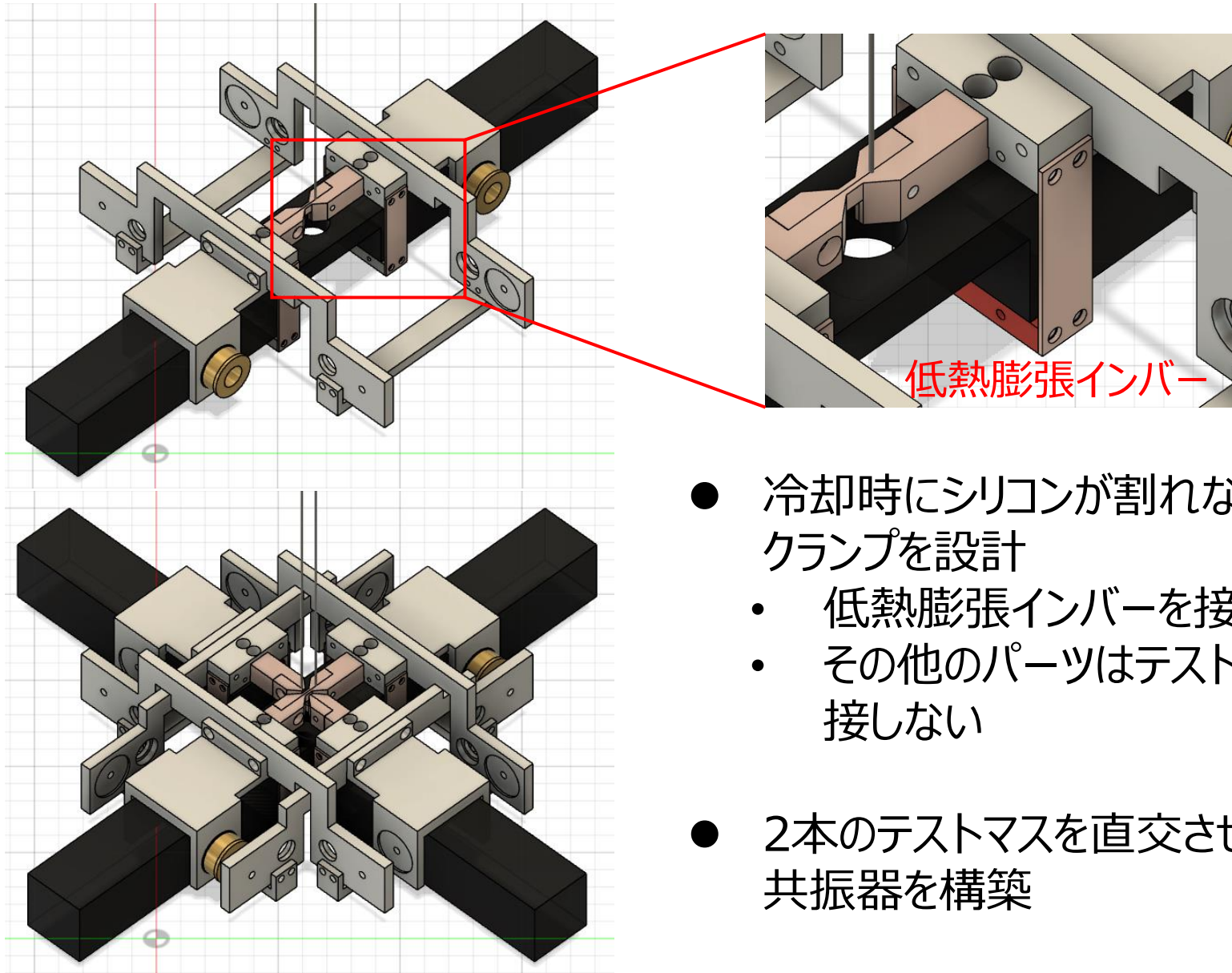
テストマス ×2

- 中段マスから1本吊り
- テストマス間で共振器を構築

光学ベンチ

- 中段マスからロッドで4本吊り
- 光学素子・PD・コイルなどを設置

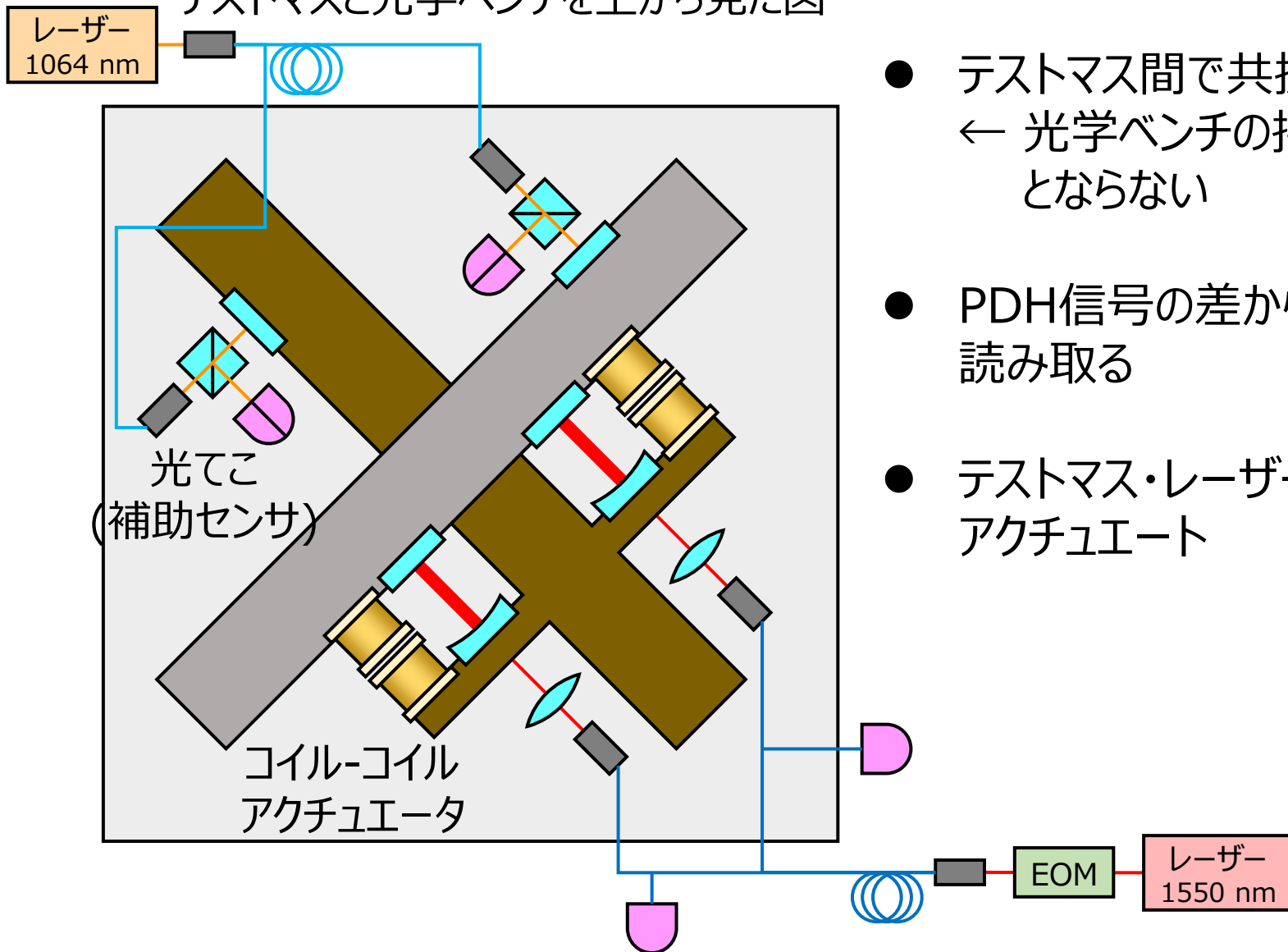
テストマスの設計



- 冷却時にシリコンが割れないようにクランプを設計
 - 低熱膨張インバーを接着
 - その他のパーツはテストマスに接しない
- 2本のテストマスを直交させ共振器を構築

光学系の設計

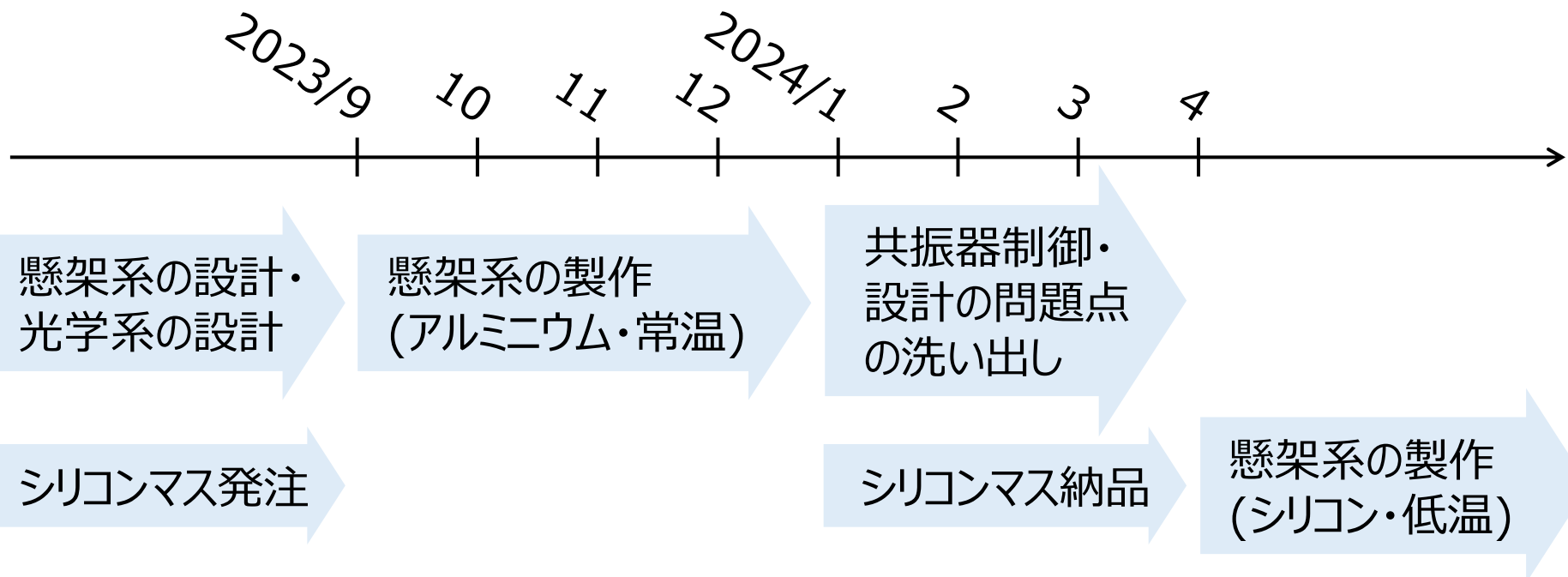
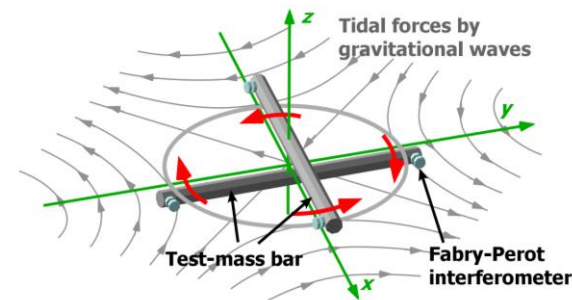
テストマスと光学ベンチを上から見た図



- テストマス間で共振器を構築
← 光学ベンチの揺れが雑音
とならない
- PDH信号の差から回転を
読み取る
- テストマス・レーザー周波数で
アクチュエート

まとめ・今後の予定

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA で 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- プロトタイプ検出器 Phase-III TOBA を開発中
- 懸架系・読み取り光学系の設計を行った
 - ・ 目標感度: $6 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$ (懸架ワイヤの熱雑音リミット)
 - ・ シリコン製ねじれ振り子・差動ファブリペロー共振器での角度読み取り

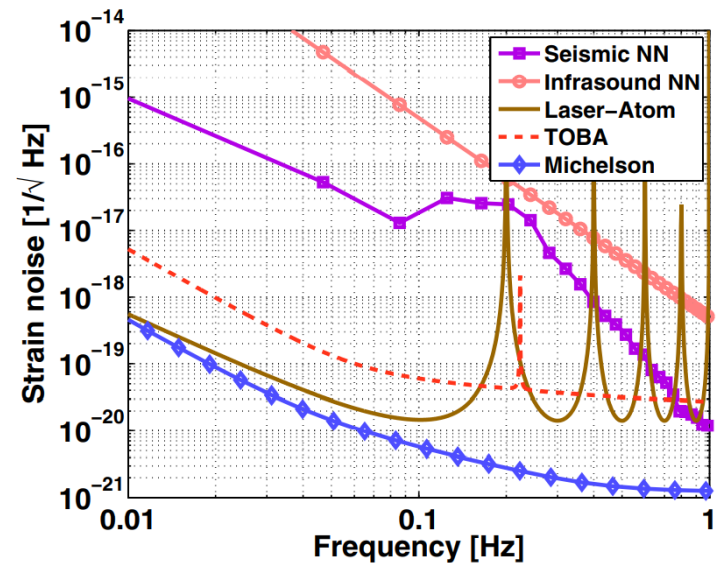
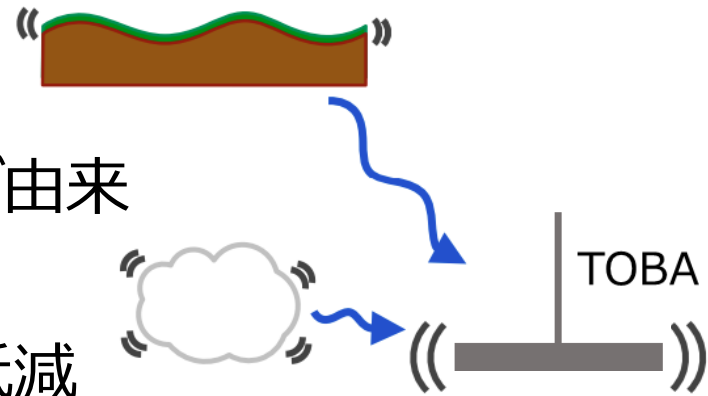


予備スライド

重力勾配雑音

地球物理の観測

- 重力勾配雑音: 大気や地面の揺らぎ由来
 - 初の直接検出 (Phase-III)
 - 第3世代重力波望遠鏡の雑音低減



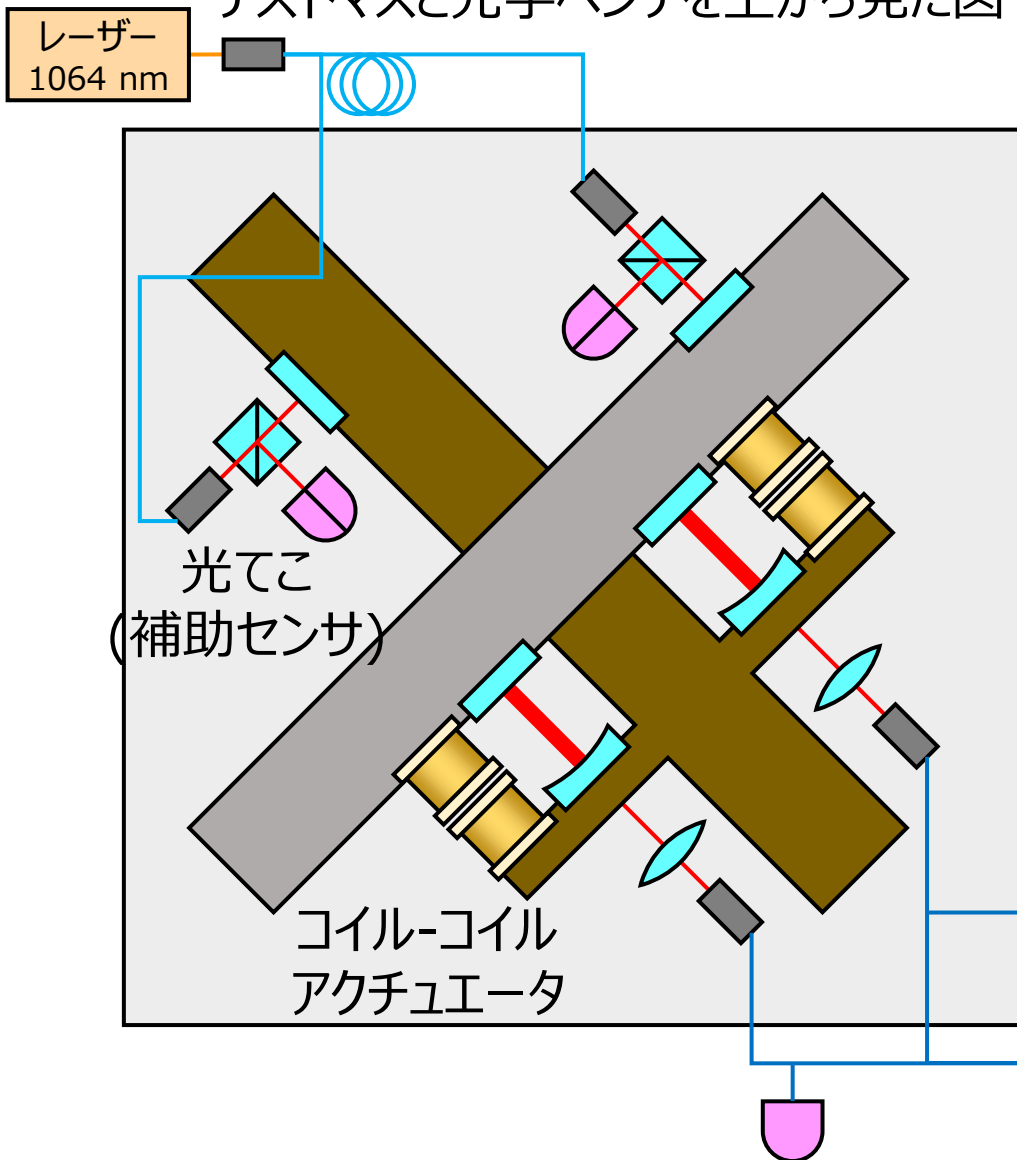
[J. Harms+ \(2013\)](#)

懸架系・光学系の構成

	先行研究 下田智文 博士論文 (2019)	本研究①	本研究②
温度	低温	常温	低温
角度読み取り 光学系	光てこ	差動ファブリペロー 共振器	差動ファブリペロー 共振器
テストマス基材	銅	アルミニウム	シリコン
ミラー基材	溶融石英	溶融石英	シリコン
	達成感度: $7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$	設計の問題点・ 雑音源の洗い出し	目標感度: $6 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$

光学系の設計

テストマスと光学ベンチを上から見た図



- テストマス間で共振器を構築
← 光学ベンチの揺れが雑音とならない
- PDH信号の差から回転を読み取る

インプット ミラー	曲率	150 mm
	反射率	99%
エンド ミラー	曲率	フラット
	反射率	99.5%
フィネス		417