

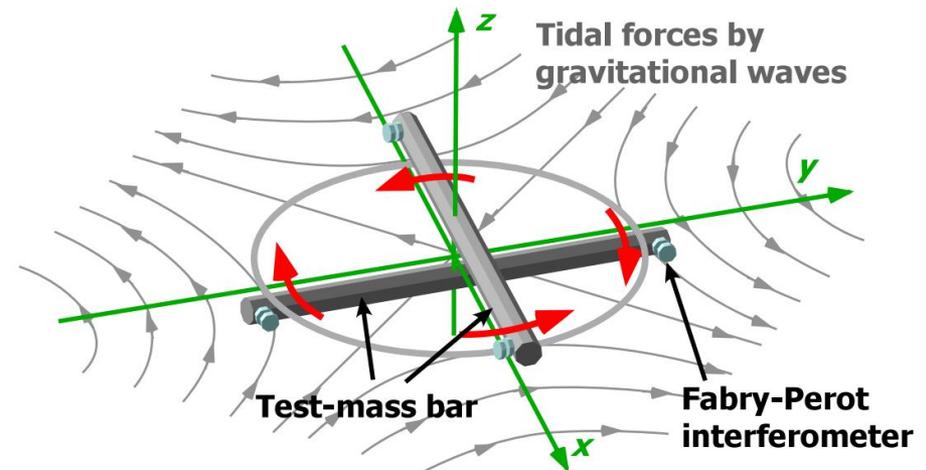
ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (34)

大島 由佳^A, 高野 哲^A, Ooi Ching Pin^A,
道村 唯太^{B,C}, 安東 正樹^{A,C}

東大理^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 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

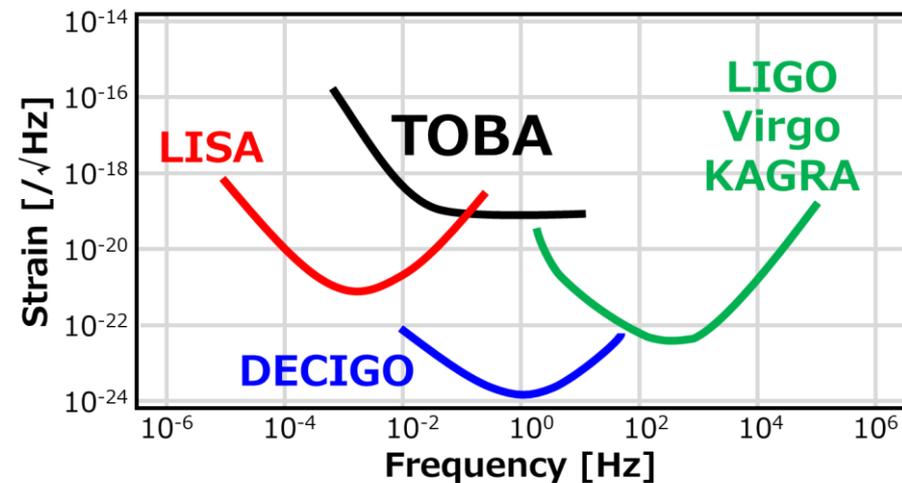
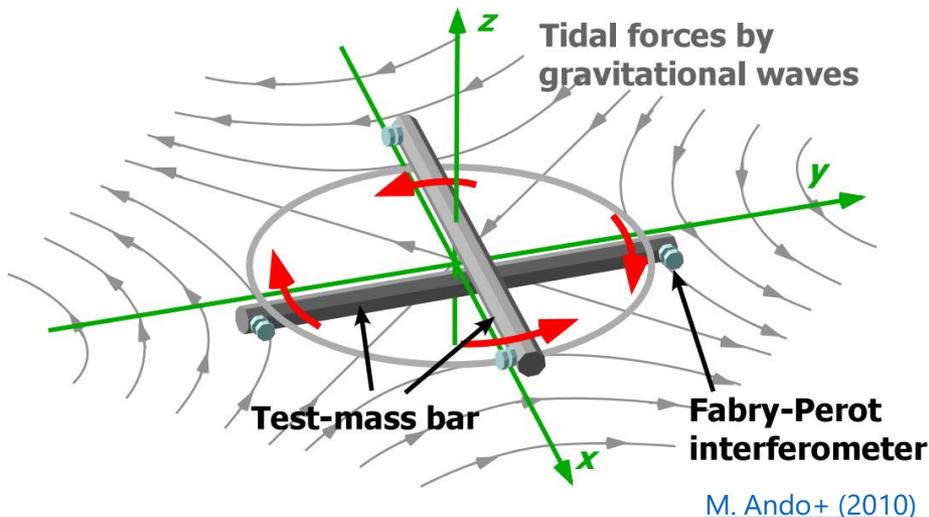
- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
 - 原理
 - サイエンス
 - 開発の流れ
- プロトタイプ Phase-III TOBA
 - 構成
 - 目標感度
 - 開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 構成・目的
 - アクチュエータ
 - 光学系

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
 - 開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 構成・目的
 - アクチュエータ
 - 光学系

ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA

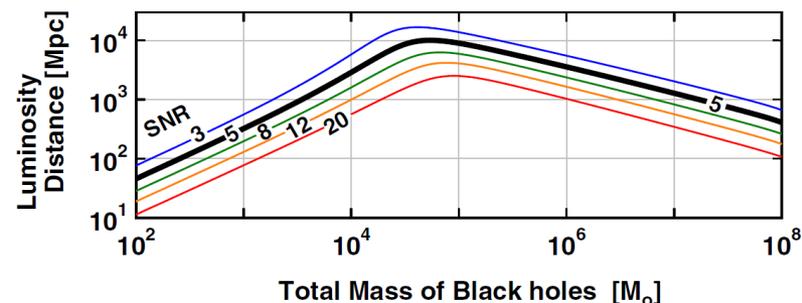
- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスで潮汐力によるねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い (~ 1 mHz)
 - 地上で低周波数に高感度
- 宇宙打ち上げの技術開発・コストが不要
- 地上のためメンテナンスが簡単
- 地上ならではのサイエンス



TOBA で得られるサイエンス (1)

低周波重力波望遠鏡として

- 中間質量ブラックホール連星合体
 - ~ 1 Mpc 以内 (Phase-III)
 - ~ 10 Gpc 以内 (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

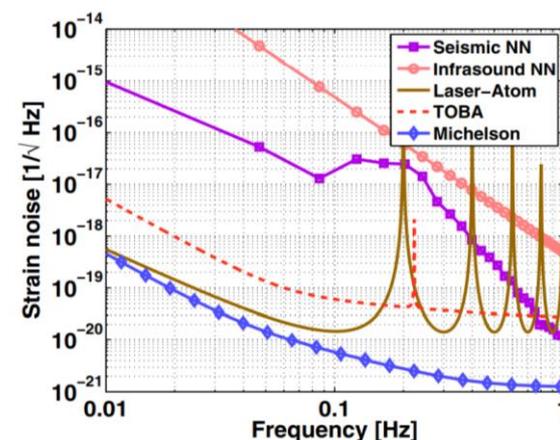


[M. Ando+ \(2010\)](#)

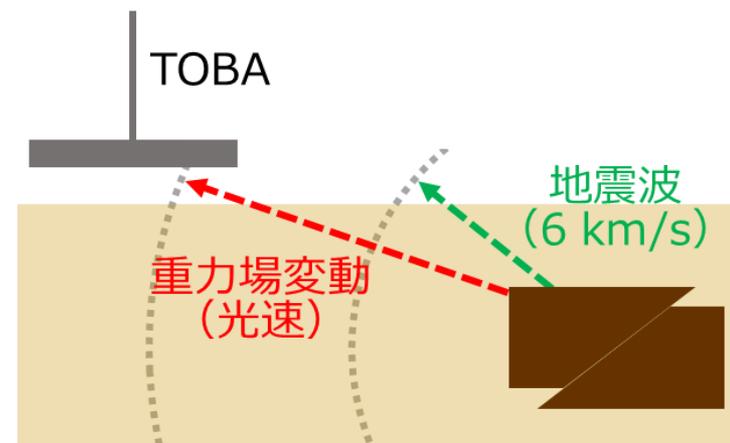
TOBA で得られるサイエンス (2)

重力勾配計として

- 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)
→ 社会への貢献



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



 この記事は会員限定です

大地震、「超速報」で社会を守る 光速の重力変化を検知

日経産業新聞

[+ フォローする](#)

2022年6月13日 2:00 [有料会員限定]



地震大国の日本では、大地震の発生は今後も避けられない。だが将来はもっと対処しやすくなるかもしれない。東京大学は地震発生時に光の速さで伝わる重力の変化を捉える技術を開発中だ。実現すれば、2011年の東日本大震災のように陸から遠くで起きた地震では10秒以上早く緊急地震速報を出せるようになる。人々の安全確保につながり社会インフラも守りやすくなる。研究者は2050年ごろの実用化を見据える。

TOBA 開発の流れ

Phase-I

Phase-II

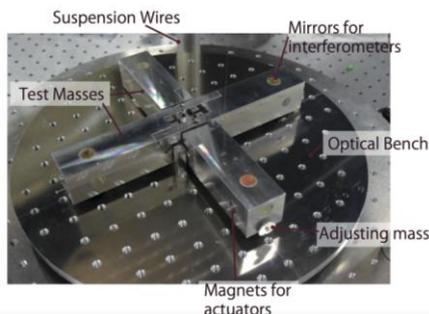
現在

Phase-III

Final

原理実証

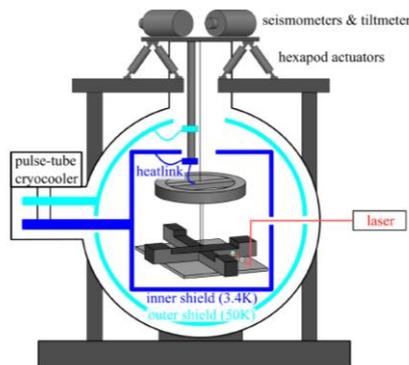
$10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ (達成)
20 cm 試験マス
室温



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

要素開発・雑音低減

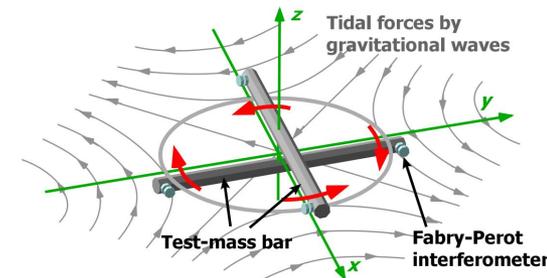
$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
35 cm 試験マス
低温 (4 K)



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

本観測

$10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
10 m 試験マス
低温 (4 K)



- Phase-III TOBA の試験マスを 6 K に冷却することに成功
→ ねじれ振り子を製作し感度を追求する段階

[下田智文 博士論文 \(2019\)](#)

目次

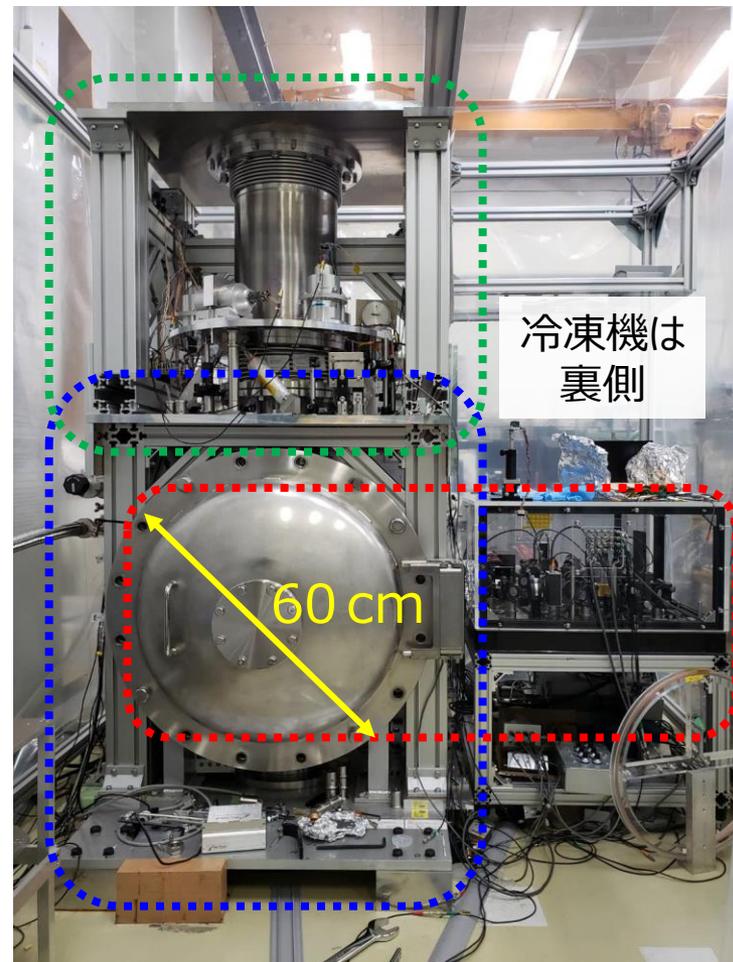
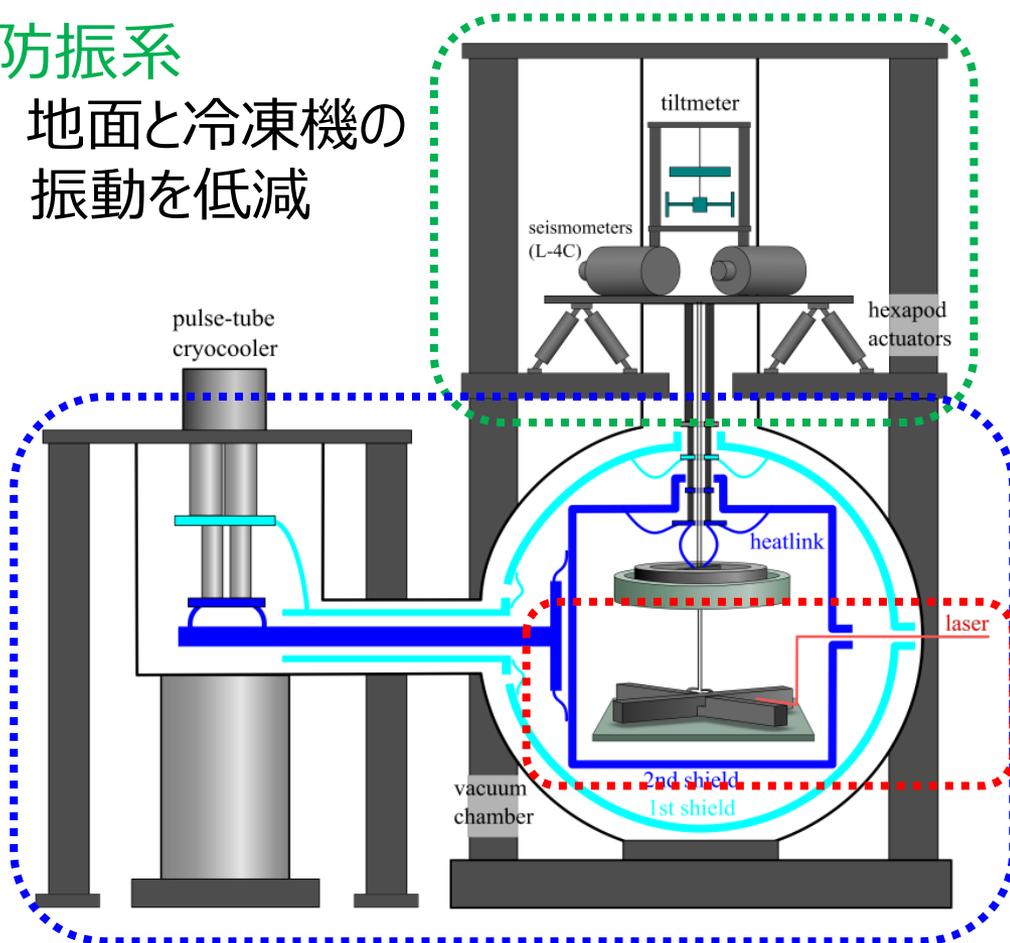
- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA
 - 原理
 - サイエンス
 - 開発の流れ
- プロトタイプ Phase-III TOBA
 - 構成
 - 目標感度
 - 開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 構成・目的
 - アクチュエータ
 - 光学系

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



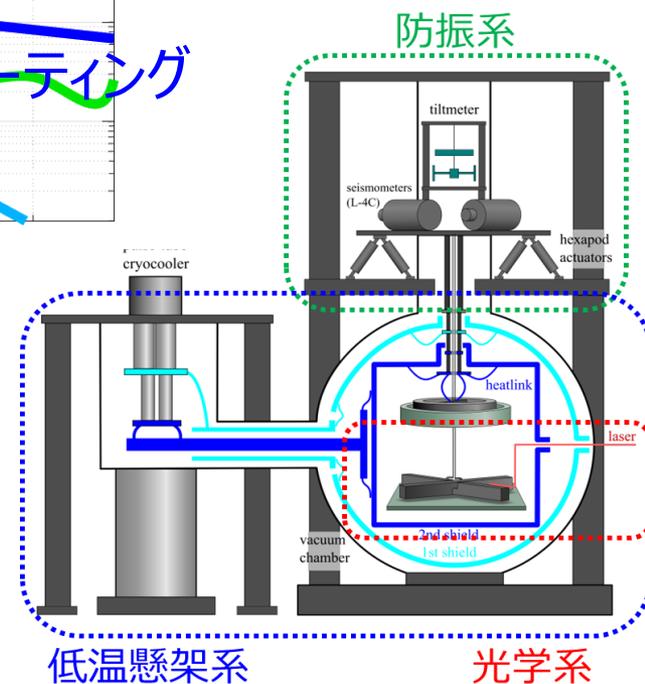
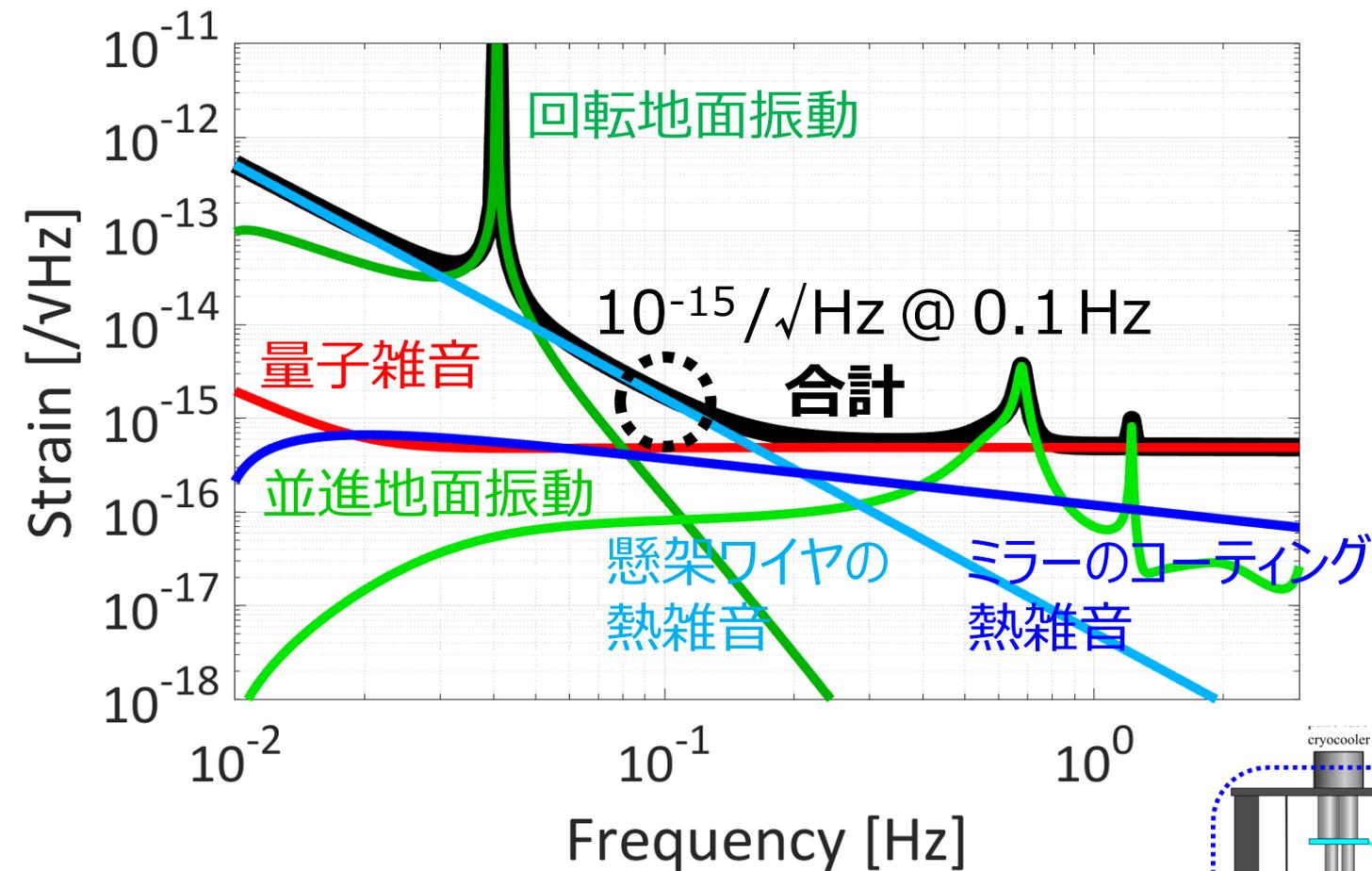
低温懸架系

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

Phase-III TOBA の目標感度



Phase-III TOBA の開発項目

● 防振系

- 多段振り子による受動防振
- 地震計とピエゾアクチュエータを用いた能動防振 ✓
- 並進地面振動からのカップリングの低減 ✓

● 低温懸架系

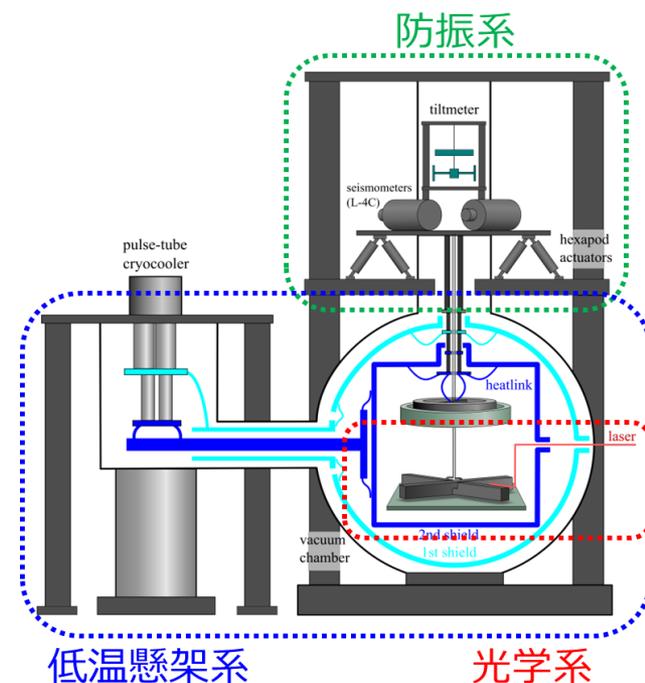
- 試験マスを6 Kまで冷却 ✓
- 低温で高いQ値をもつ懸架ワイヤ

Ooiさんの講演

● 光学系

- モリシック差動ファブリペロー共振器

高野さんの講演



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
 - 開発項目
- 懸架系・読み取り光学系の設計
 - 構成・目的
 - アクチュエータ
 - 光学系

懸架系・光学系の構成

	Phase-I ・ Phase-II TOBA	Phase-III TOBA 先行研究	Phase-III TOBA 本研究
温度	常温	低温	低温
基材	アルミニウム・ 溶融石英	銅	シリコン
制御用 アクチュエータ	コイル－マグネット・ コイル－コイル	コイル－コイル	コイル－コイル
角度読み取り 光学系	マイケルソン干渉計	光てこ	差動ファブリペロー 共振器

懸架系・光学系の構成

	Phase-I・ Phase-II TOBA	Phase-III TOBA 先行研究	Phase-III TOBA 本研究
温度	常温	低温	常温 → 低温
基材	アルミニウム・ 溶融石英	銅	銅 → シリコン
制御用 アクチュエータ	コイル - マグネット・ コイル - コイル	コイル - コイル	コイル - コイル
角度読み取り 光学系	マイケルソン干渉計	光てこ	差動ファブリペロー 共振器

- 簡略化した構成での実験
 - 差動ファブリペロー共振器による角度読み取りの実証
 - 設計の問題点・雑音源の洗い出し

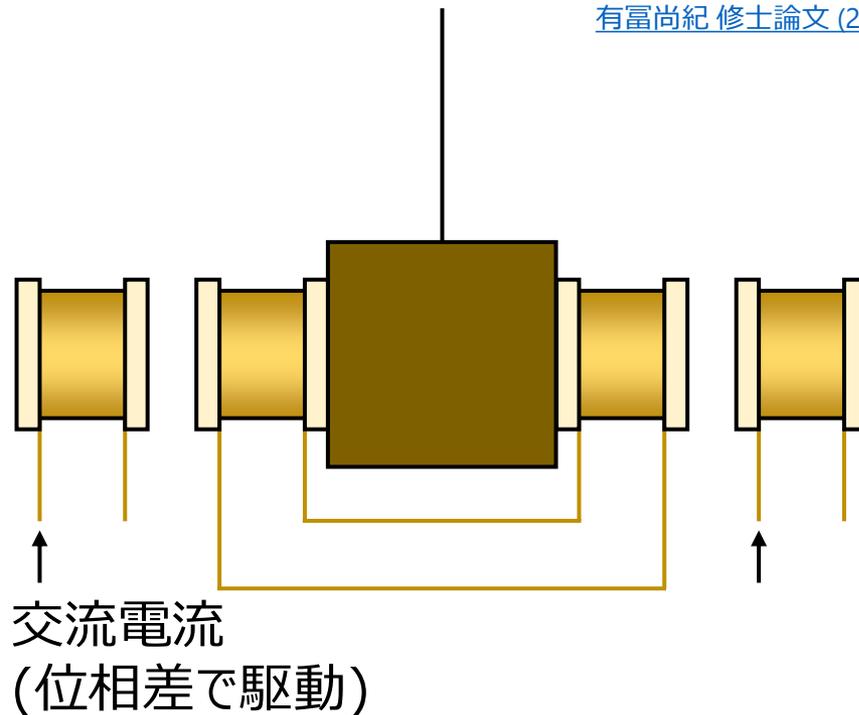
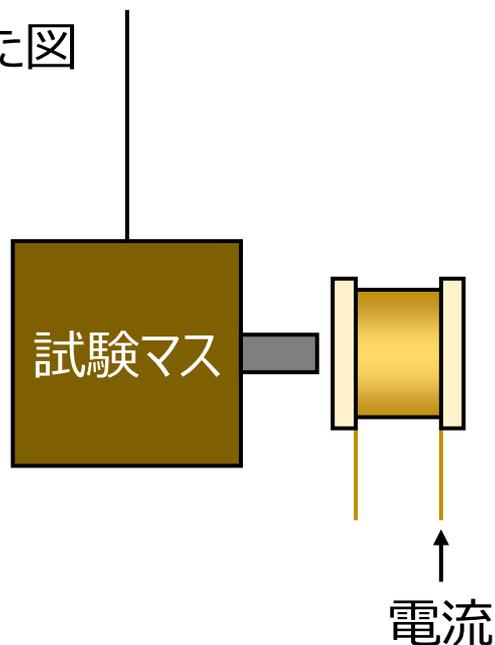
コイル－コイルアクチュエータ

コイル－マグネットアクチュエータ

コイル－コイルアクチュエータ

正田亜八香 修士論文 (2011)
有富尚紀 修士論文 (2016)

横から見た図

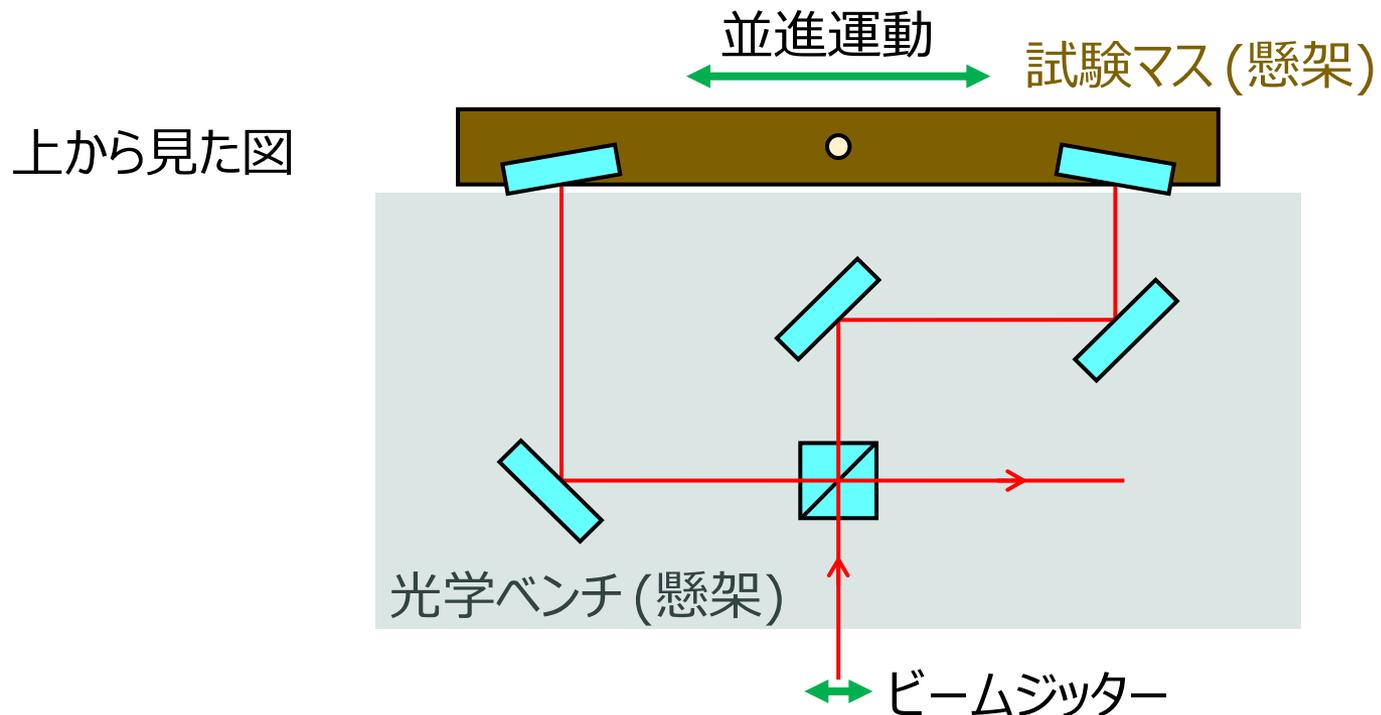


- 外部磁場の変動が試験マスにトルクを与え雑音となる
- 低温で使用できるものもある

- 外部磁場の変動による雑音が小さい
- 低温でも使用できる

先行研究の光学系の問題点

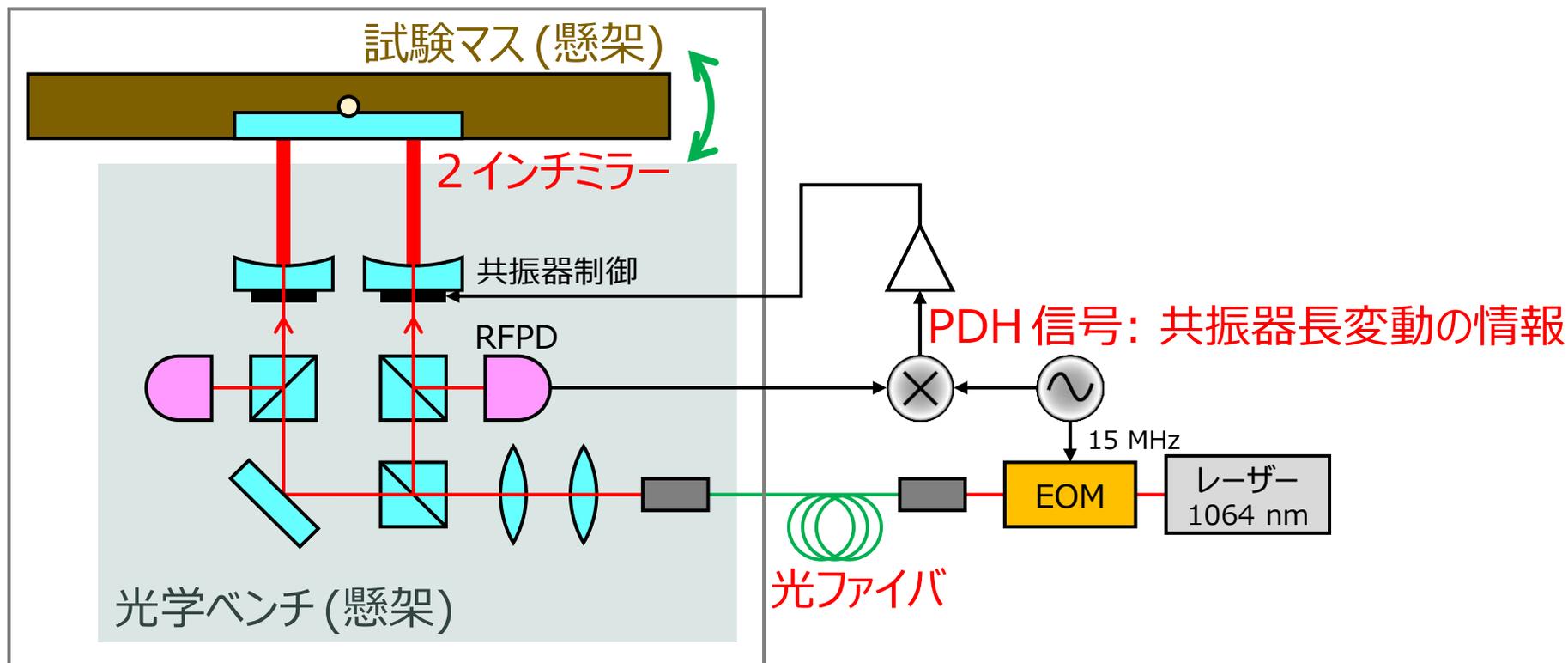
- 両端の鏡の非平行性
→ 並進運動からのカップリング雑音
- 空間光によるレーザーの導入
→ ビームジッター雑音



角度読み取り光学系の設計

- 2つのファブリペロー共振器のPDH信号の引き算から角度を読み取る
- 並進運動からのカップリング低減のために
エンドミラーに2インチミラーを使用
- ビームジッター低減のために光ファイバでレーザーを導入

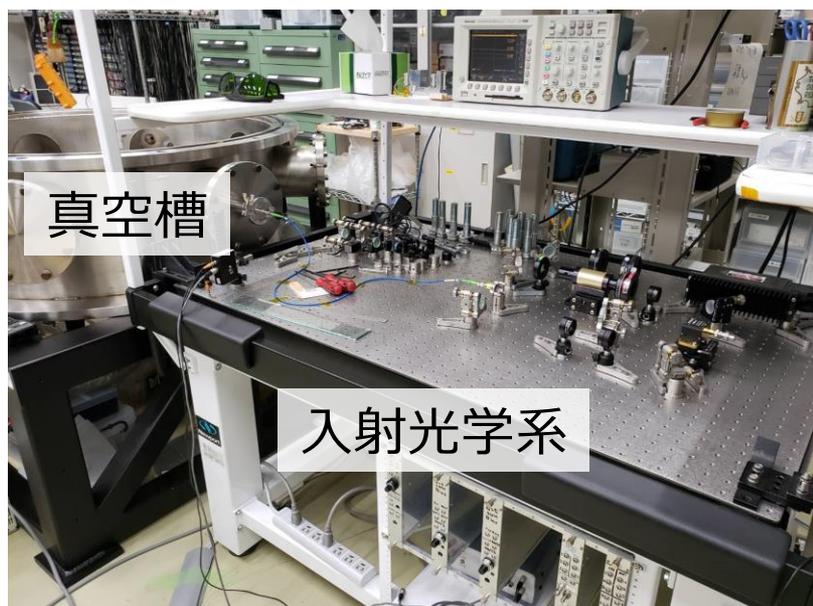
上から見た図



~5 Pa

現状

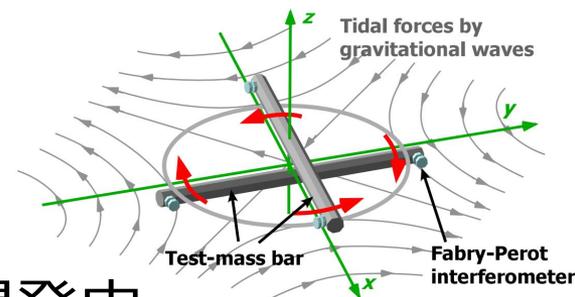
- 入射光学系の構築完了
- 共振器用ミラーの発注完了
- 試験マスの設計完了・光学ベンチ設計中



インプットミラー	反射率	99.5%
	曲率	20 cm
	直径	0.5 インチ
エンドミラー	反射率	99.9%
	曲率	フラット
	直径	2 インチ

まとめ・今後の展望

- 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
- 過去のプロトタイプで得られた知見をもとに 懸架系・読み取り光学系の設計を行った



2022/12

2023/4

回路の製作
懸架系・光学系の組み立て

性能評価
ノイズハンティング

低温懸架系の製作

JSR Fellowship 本研究は東京大学 JSR フェロウシップの支援を受けた

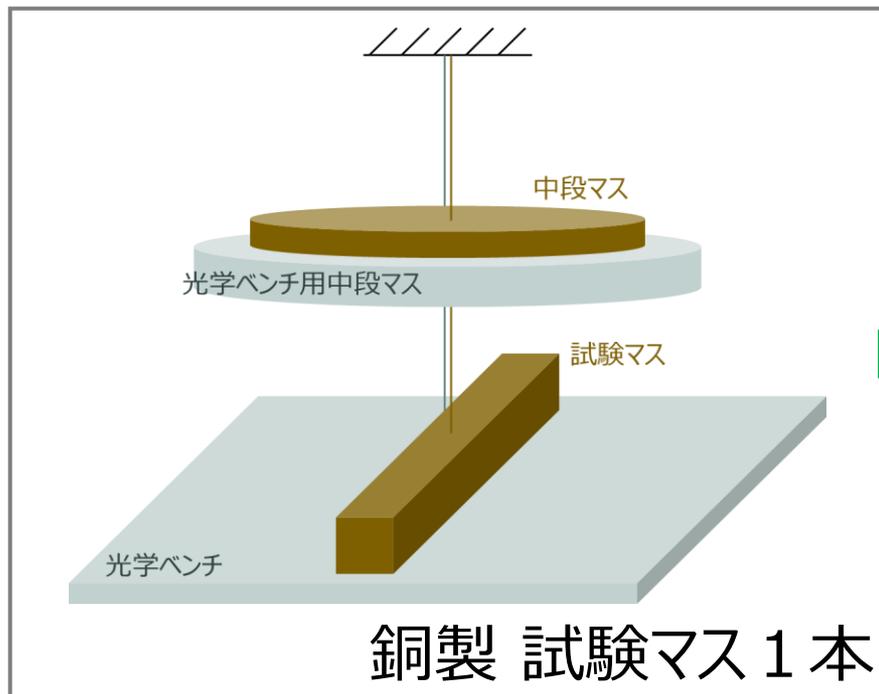
日本物理学会 2022/09/07 岡山理科大学

21 / 21

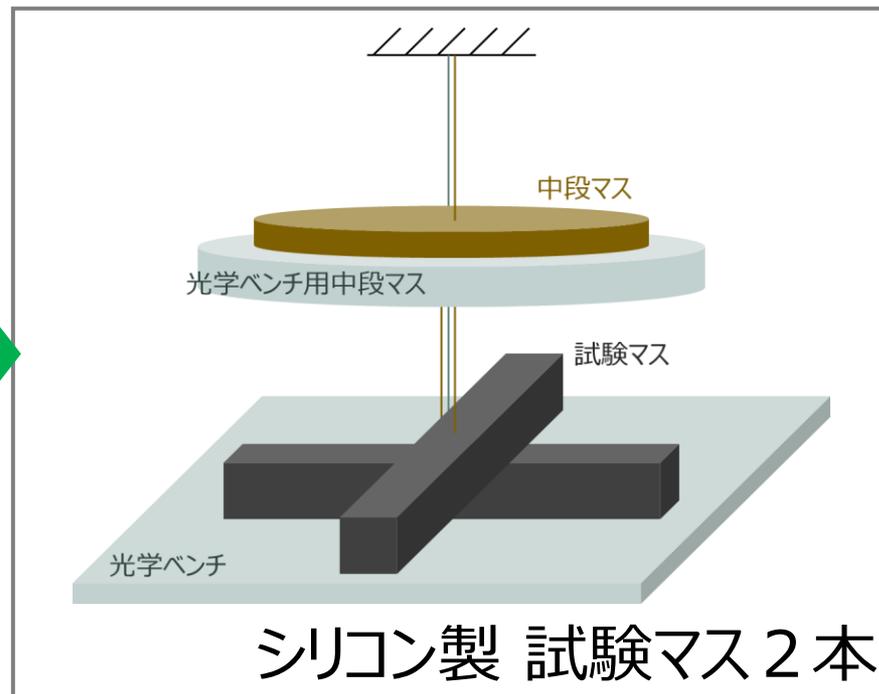
予備スライド

全体の構成の計画

ステップ1: 常温, ~ 5 Pa



ステップ2: 4 K, $< 10^{-4}$ Pa

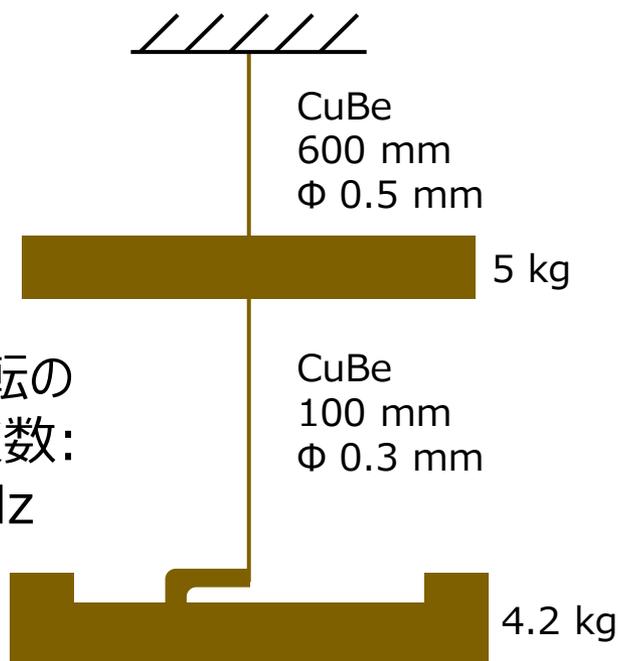


- 過去のプロトタイプで得られた知見をもとにステップ1の設計を行った
- ステップ1の目的
 - 差動ファブリペロー共振器による角度読み取りの実証
(過去のプロトタイプ: マイケルソン干渉計, 光てこ)
 - 設計の問題点・雑音源の洗い出し

ねじれ振り子の設計

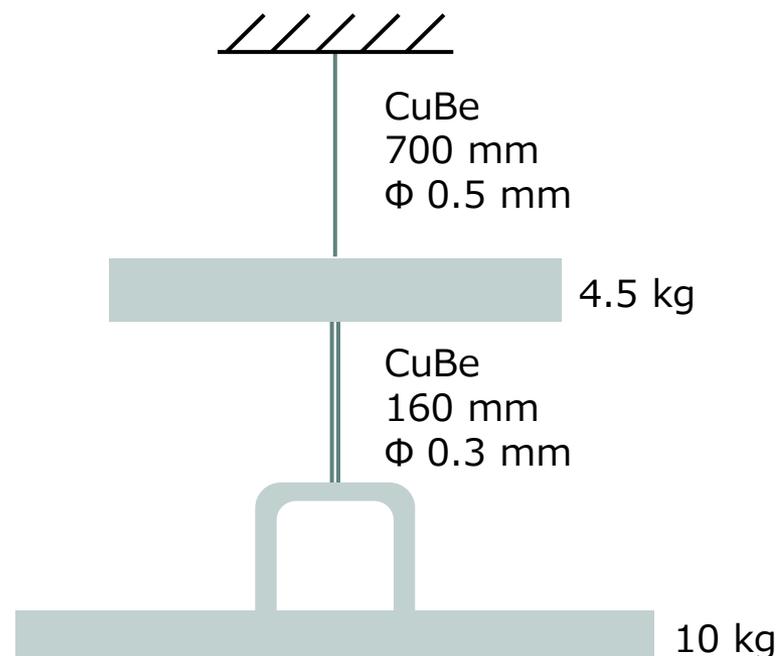
- マスの基材: 銅
 - 磁化率が小さく磁場変動による雑音が小さい
- アクチュエータ: コイル-コイル アクチュエータ
 - 磁石を使わないため磁場変動による雑音が小さい
 - 低温でも使用できる

試験マス懸架系



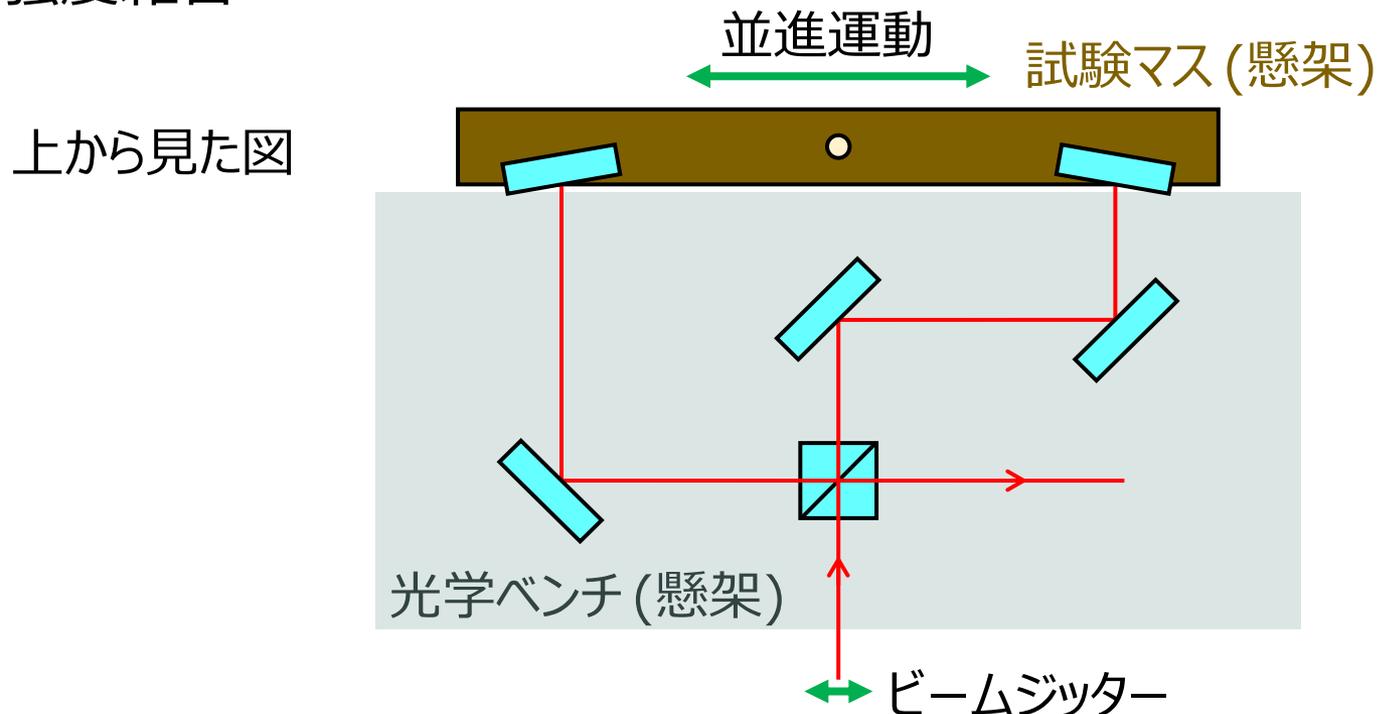
ねじれ回転の
共振周波数:
~10 mHz

光学ベンチ懸架系



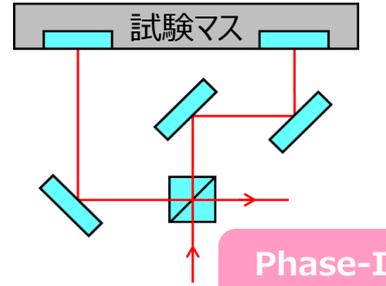
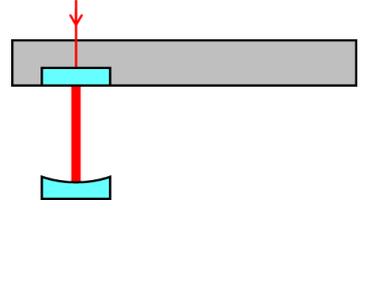
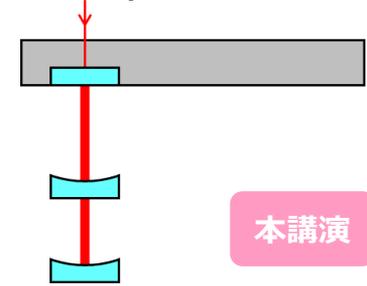
先行研究の光学系の問題点

- 両端の鏡の非平行性
→ 並進運動からのカップリング雑音
- 空間光によるレーザーの導入
→ ビームジッター雑音
- 光ファイバの偏光雑音・ビームスプリッタ分岐比の偏光依存性
→ 強度雑音



角度センサの比較

- ねじれ振り子の回転を高感度に読み取るセンサが必要
- Phase-III TOBAの散射雑音の要求値 (角度換算): 5×10^{-16} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$

	マイケルソン干渉計 試験マス  Phase-I Phase-II	Wavefront sensor 	Coupled WFS  本講演
散射雑音	😊	😞 角度信号が 増幅されない	😊 角度信号が 増幅される
周波数雑音	😞 2つの光路の 非対称性による	😊	😊
並進カップリング	😞 2つの鏡を平行に 付けるのが難しい	😊	😊
ビームジッター雑音	😞 2つの鏡を平行に 付けるのが難しい	😞	😊 ビームジッターは 増幅しない
熱雑音	😊	😐 狭い範囲で 角度を測る	😐 狭い範囲で 角度を測る
線形レンジ	😊	😊	😞 角度信号と トレードオフ