



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

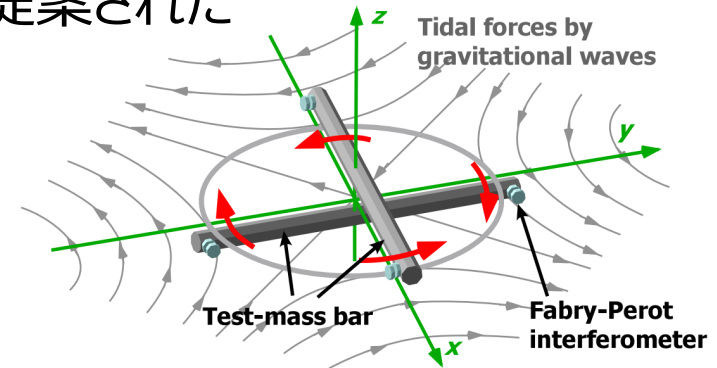
JSR Fellowship

ねじれ振り子型重力勾配計のための 角度センサの開発

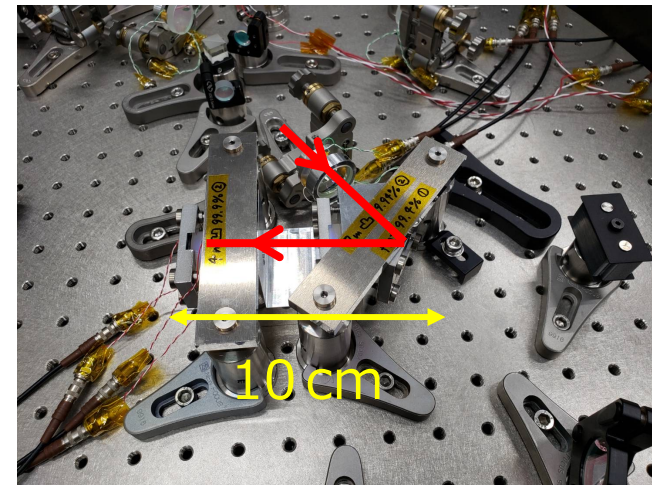
大島 由佳 (安東研究室 博士2年)

概要

- ねじれ振り子型重力勾配計TOBAを開発中
 - 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指して提案された
 - 今よりも早い地震速報も実現できる



- TOBA の角度センサとして結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS) が考案された
 - シミュレーション
 - 信号強度・線形レンジの評価
 - 原理実証実験
 - 制御手法の考案
 - 角度信号増幅の定量的な評価



目次

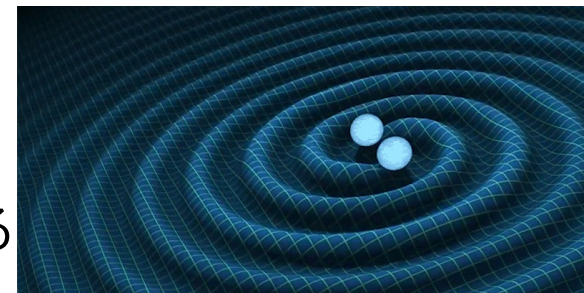
- ねじれ振り子型重力勾配計 TOBA
 - 原理
 - 開発の流れ
 - サイエンス
- 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS)
 - 原理
 - シミュレーション
 - 原理実証実験

目次

- ねじれ振り子型重力勾配計 TOBA
 - 原理
 - 開発の流れ
 - サイエンス
- 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS)
 - 原理
 - シミュレーション
 - 原理実証実験

低周波数の重力波観測

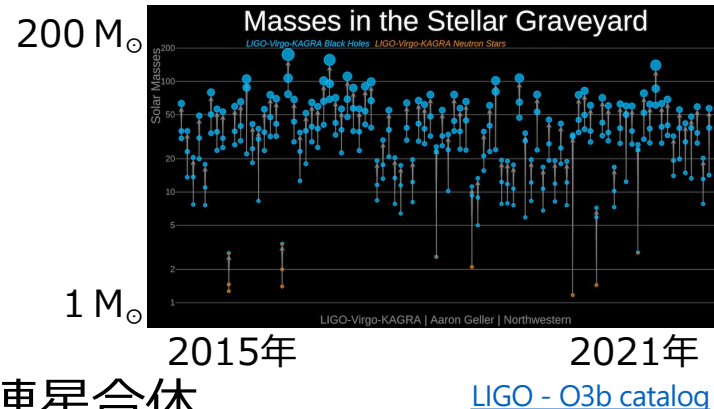
- 重力波
 - ・ 時空のゆがみが波として伝播する現象
 - ・ 電磁波では観測が難しい天体現象を観測できる



- 重力波観測の現状

- ・ レーザー干渉計型重力波望遠鏡
LIGO・Virgo・KAGRA が稼働中
- ・ 10 Hz - 1 kHz の感度が良い

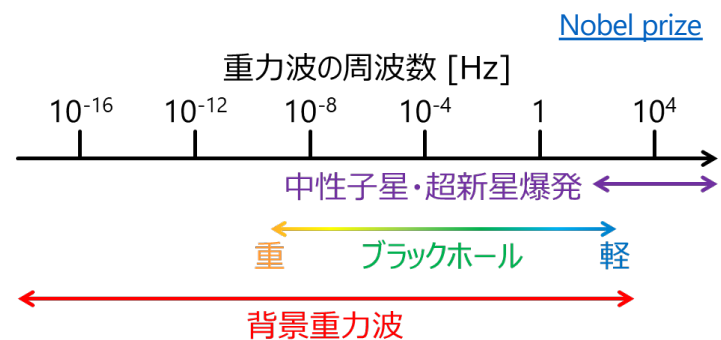
→ 恒星質量ブラックホールや中性子星の連星合体



- 低周波数の重力波観測の必要性

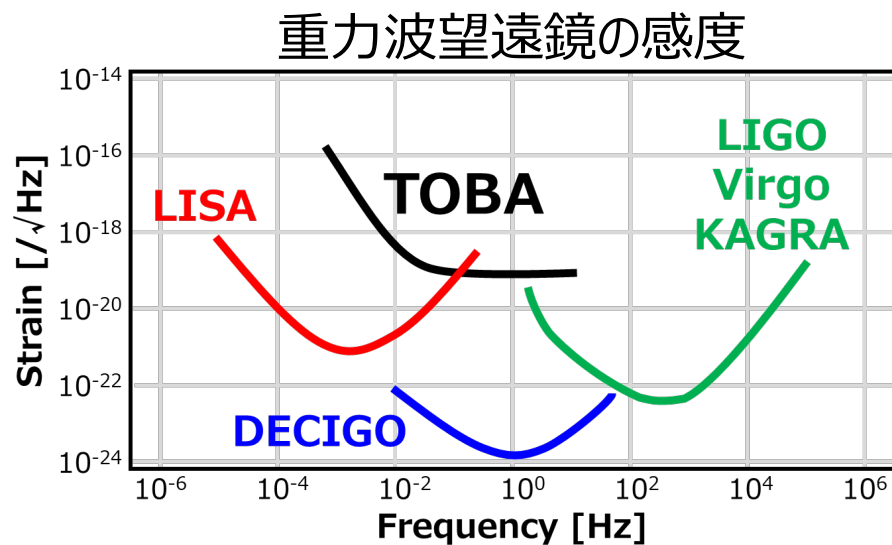
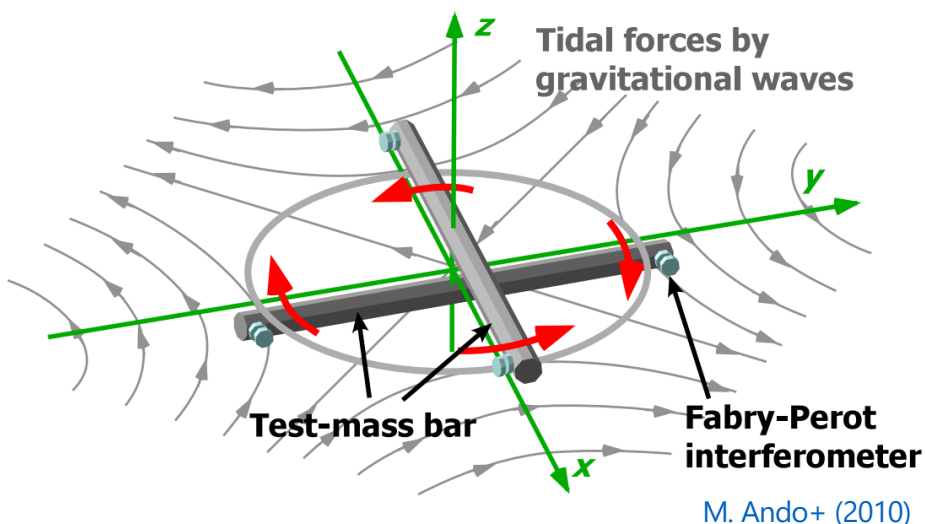
- ・ 周波数によって観測対象が異なる
- ・ 低周波数: 背景重力波・

重いブラックホール連星合体



ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA

- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 2010年に0.1 Hz帯の重力波観測を目指して提案された
- 水平に懸架した2本の棒状マスのねじれ回転を検出
- ねじれ振子子の共振周波数は低い (~ 1 mHz) \rightarrow 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 (後述)



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)

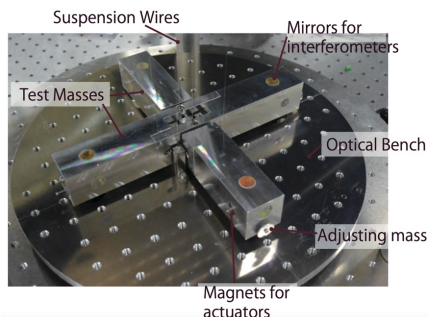
$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$
(目標)

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

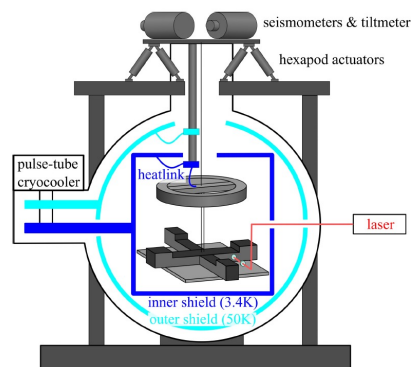
20 cm 試験マス
室温

35 cm 試験マス
低温 (4 K)

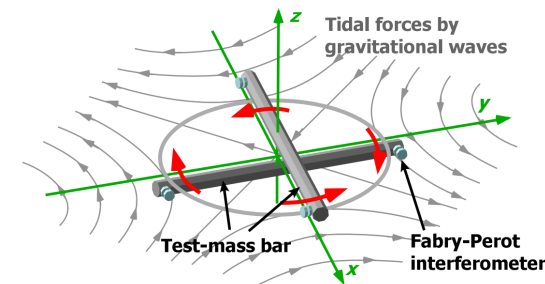
10 m 試験マス
低温 (4 K)



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



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

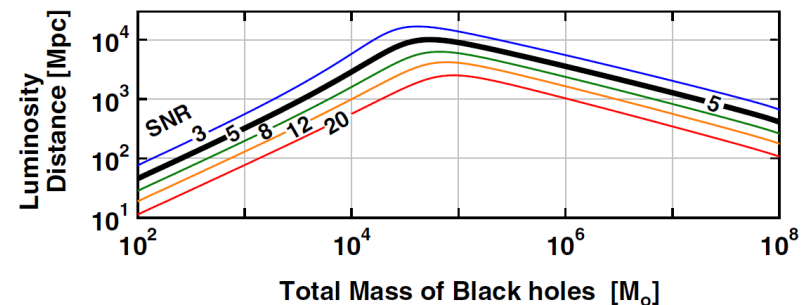


TOBA で得られるサイエンス (1)

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

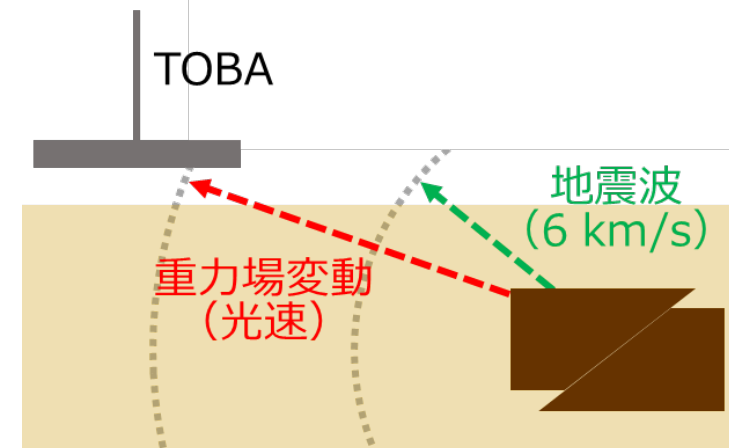
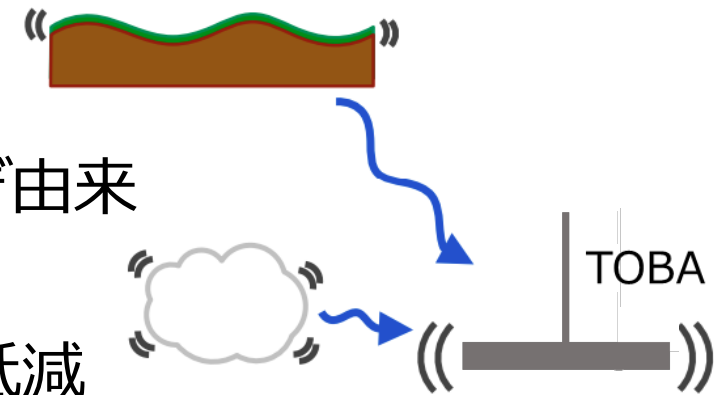


[M. Ando+ \(2010\)](#)

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

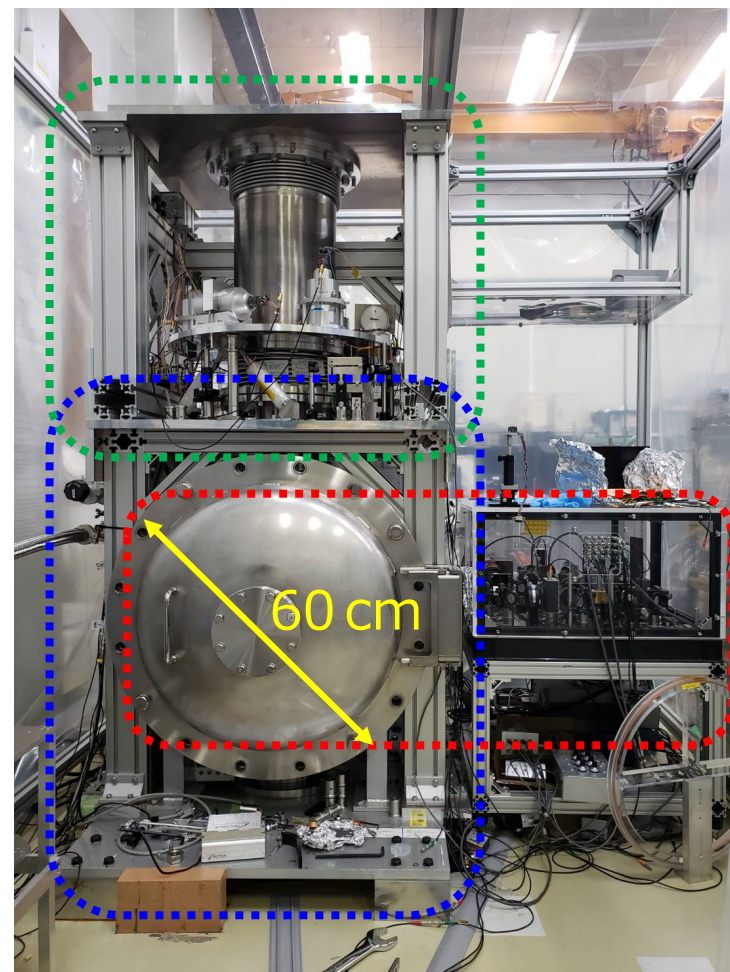
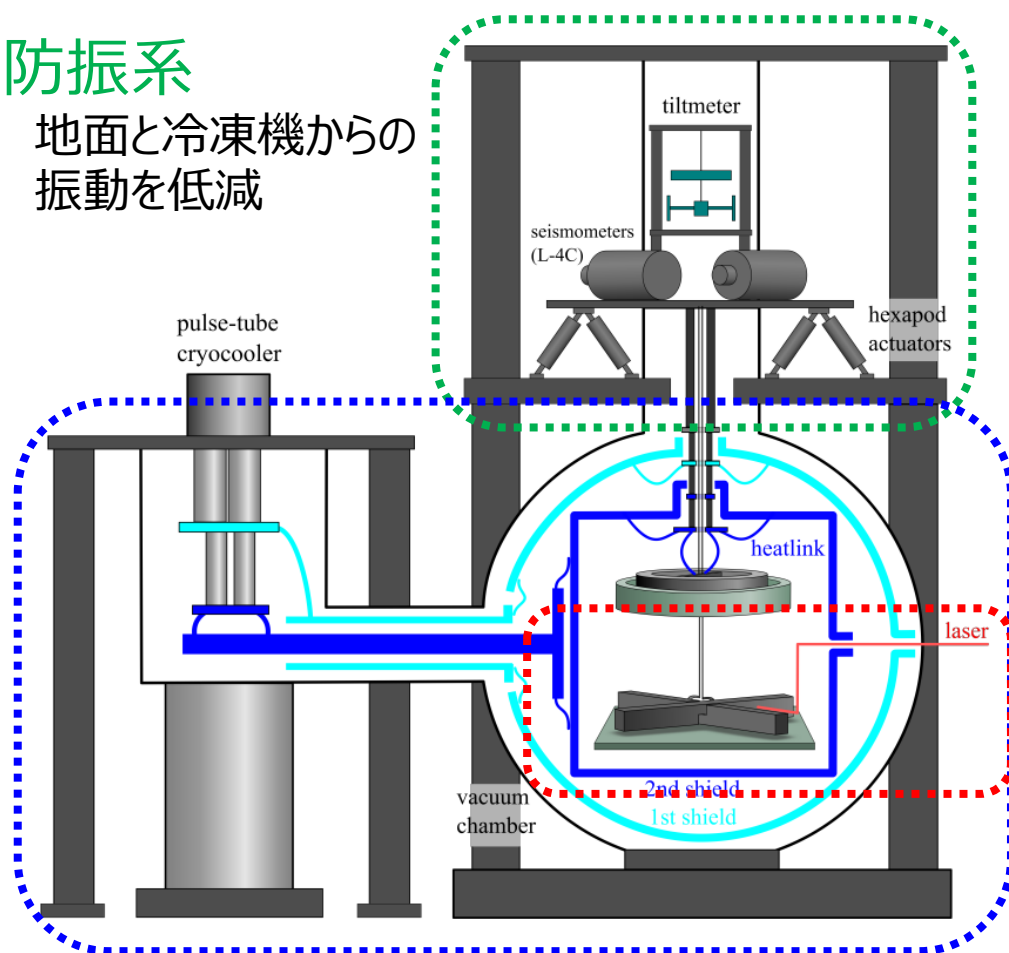


Phase-III TOBAの構成

下田智文 博士論文 (2019)

防振系

地面と冷凍機からの振動を低減



低温懸架系

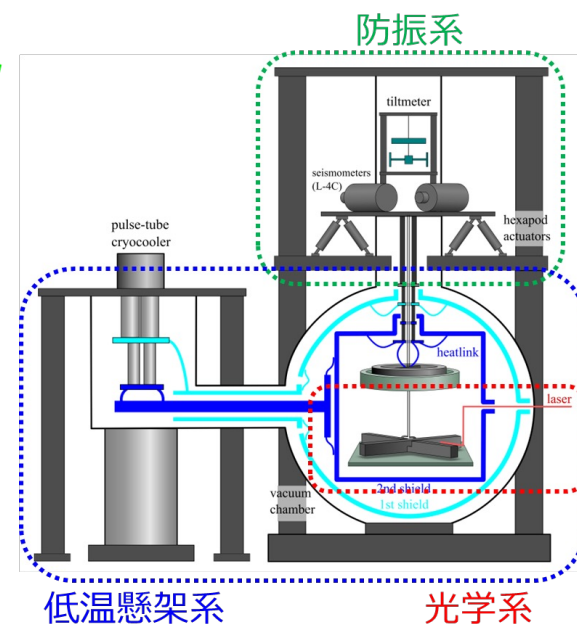
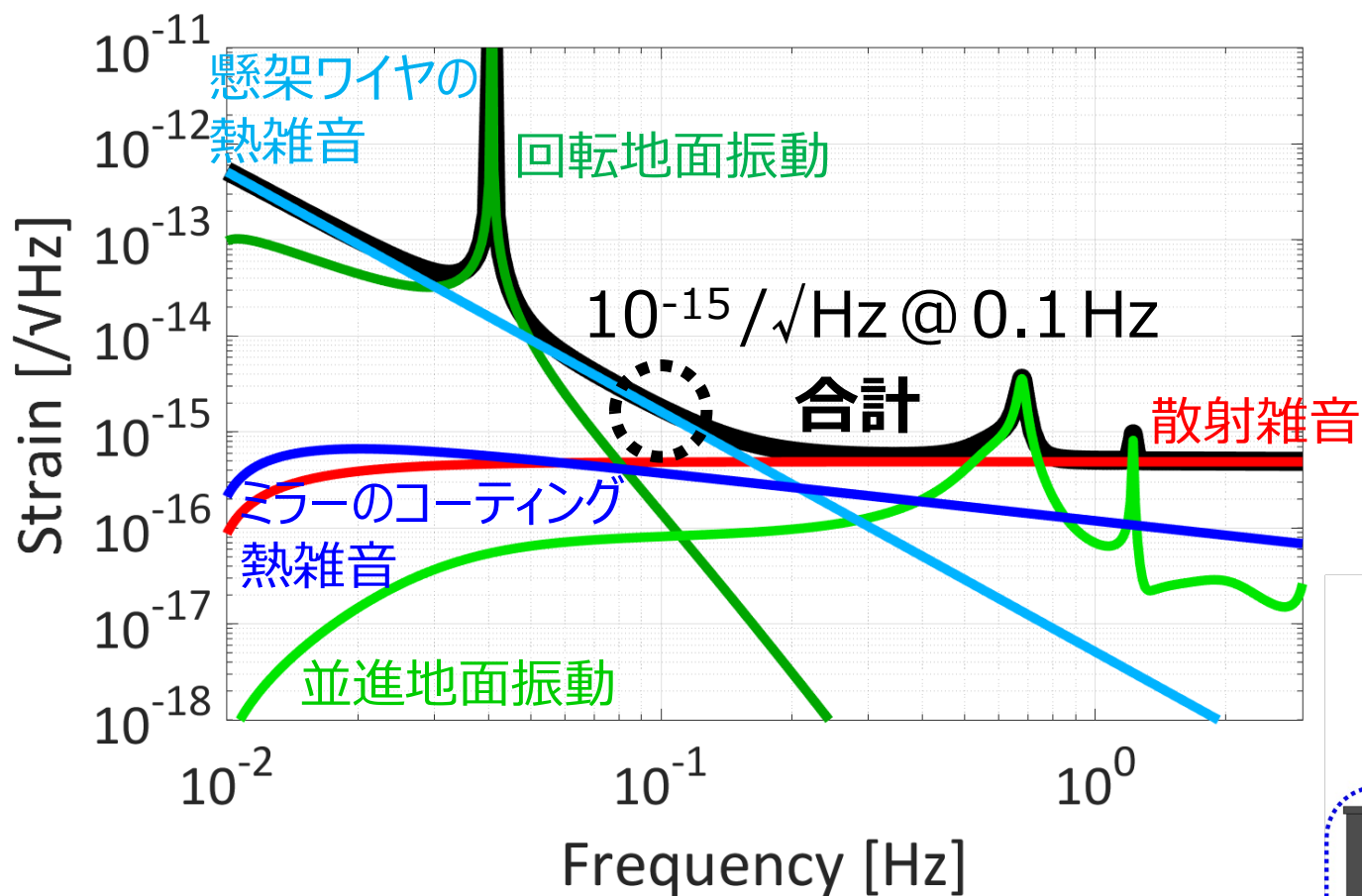
冷却されたねじれ振り子

光学系

ねじれ振り子の回転を読み取る

@理学部1号館 地下2階

Phase-III TOBA の設計感度

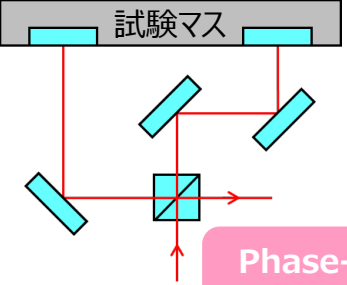
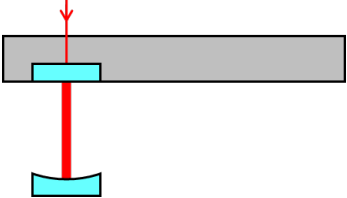
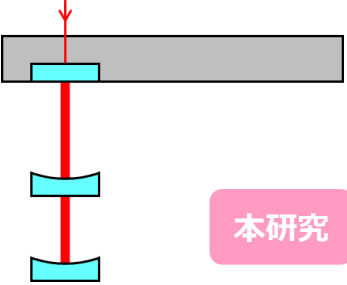

















目次

- ねじれ振り子型重力勾配計 TOBA
 - 原理
 - 開発の流れ
 - サイエンス
- 結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS)
 - 原理
 - シミュレーション
 - 原理実証実験

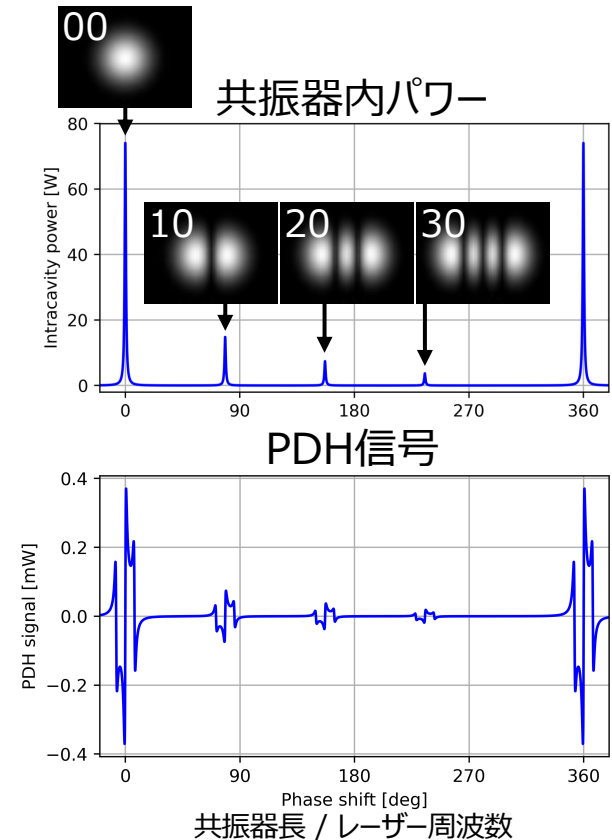
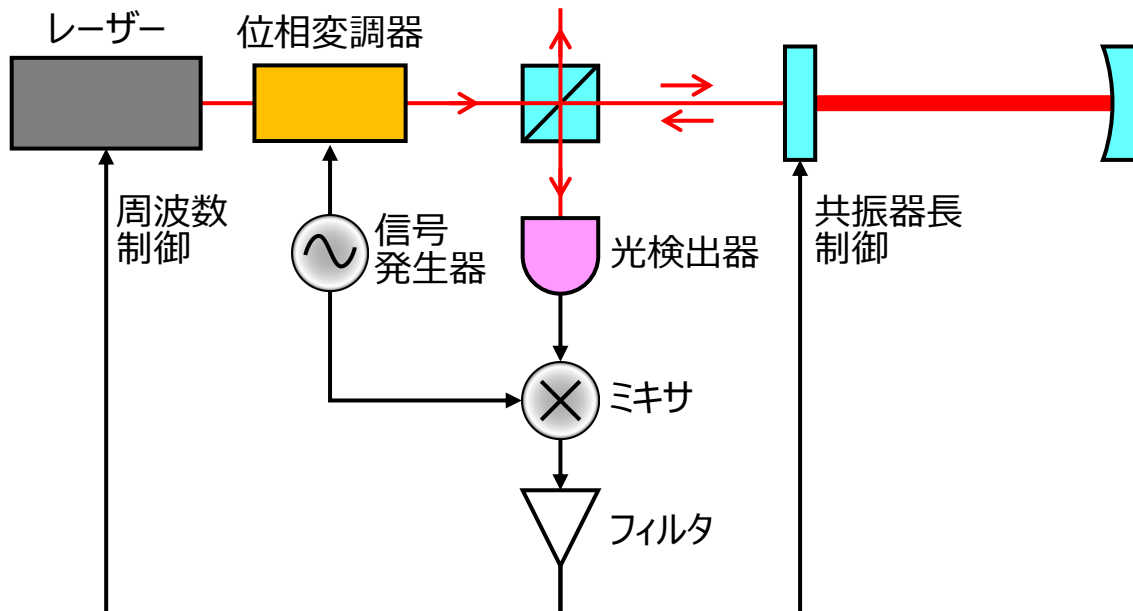
角度センサの比較

- ねじれ振り子の回転を高感度に読み取る角度センサが必要
- 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 	Wavefront sensor 	Coupled WFS 
散射雑音	 Phase-I Phase-II	 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
線形レンジ			 角度信号と トレードオフ

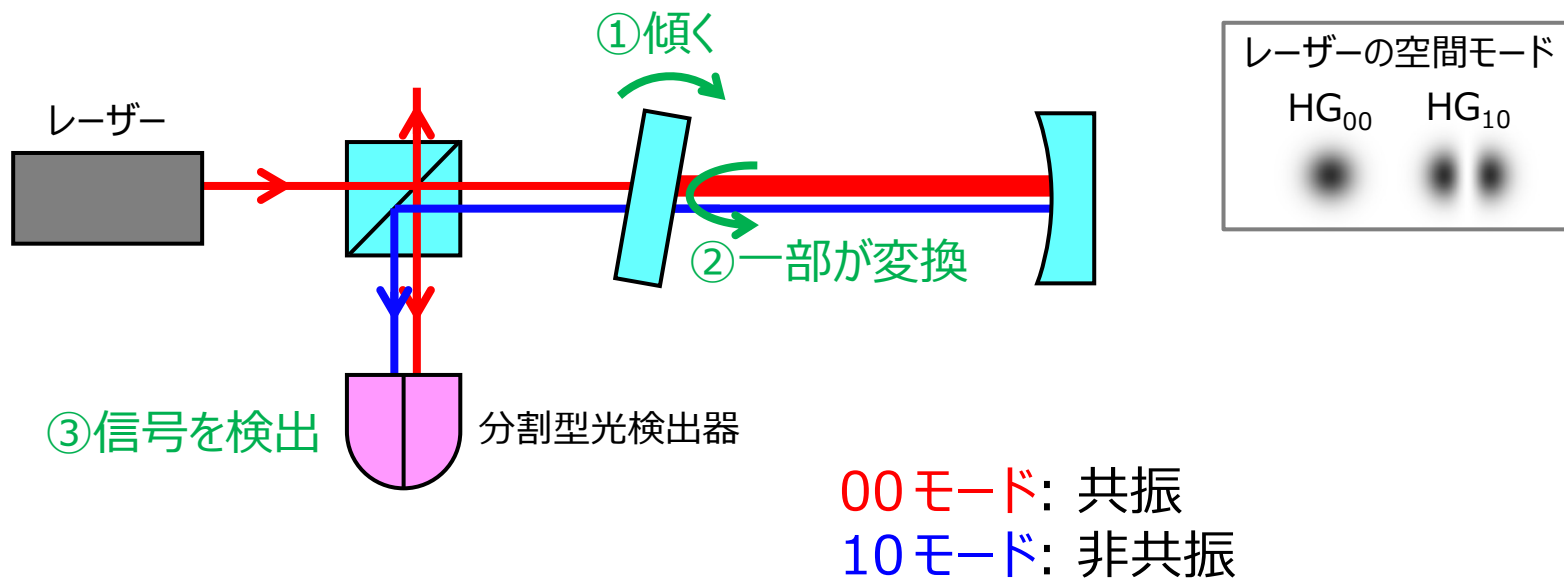
光共振器

- 光共振器: 鏡を向かい合わせて光をためる装置
 - フィネス: 光をためる能力を表す物理量
 - Gouy 位相: 00モードと10モードの位相差 → 同時に共振しない
- PDH法: 共振状態に制御する手法
 - PDH信号: 共振点まわりで線形な信号
 - フィードバック信号は鏡やレーザー光源に返す



Wavefront sensorの原理

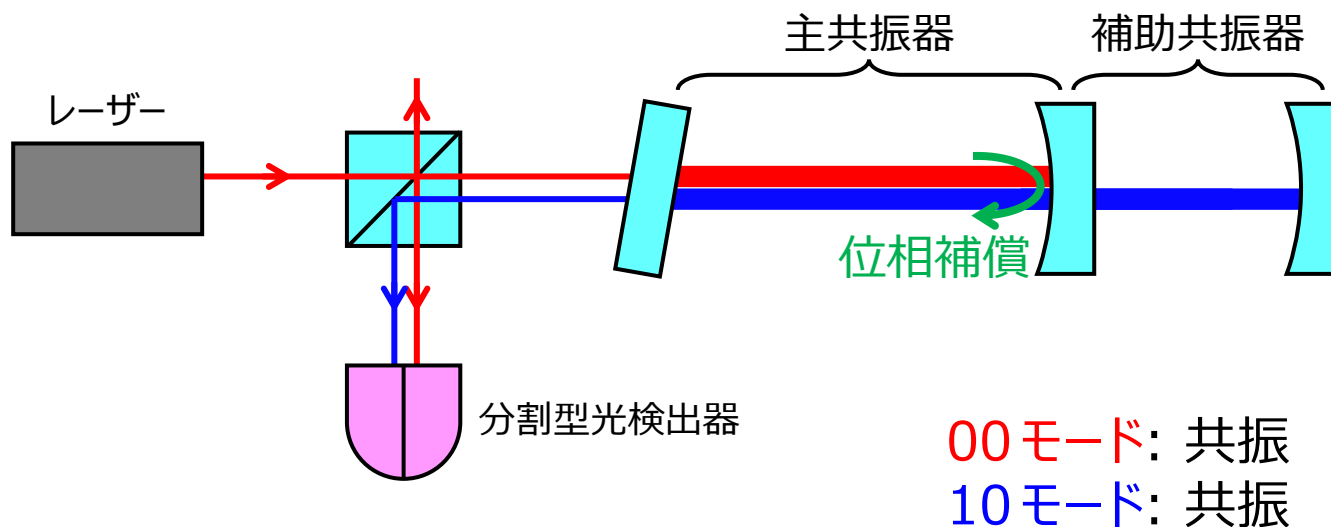
- WaveFront Sensor (WFS): 光共振器を用いた角度センサ
- ミラーの傾きで 10モードが生まれる
- 00モードと10モードの干渉を検出
- 左右の信号の差をとる → 傾き量に比例した WFS 信号



- Gouy 位相により 00モードと 10モードが同時に共振しない
→ 共振器内で 10モードが増幅されない

Coupled wavefront sensorの原理

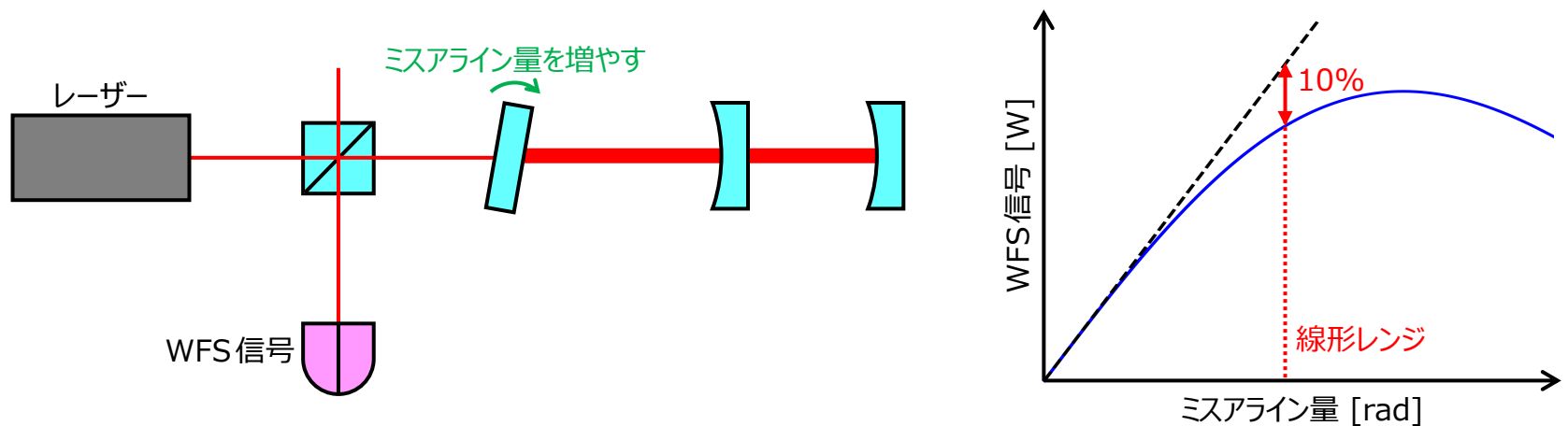
- Coupled WFS:
結合光共振器 (coupled cavity) を用いた WFS



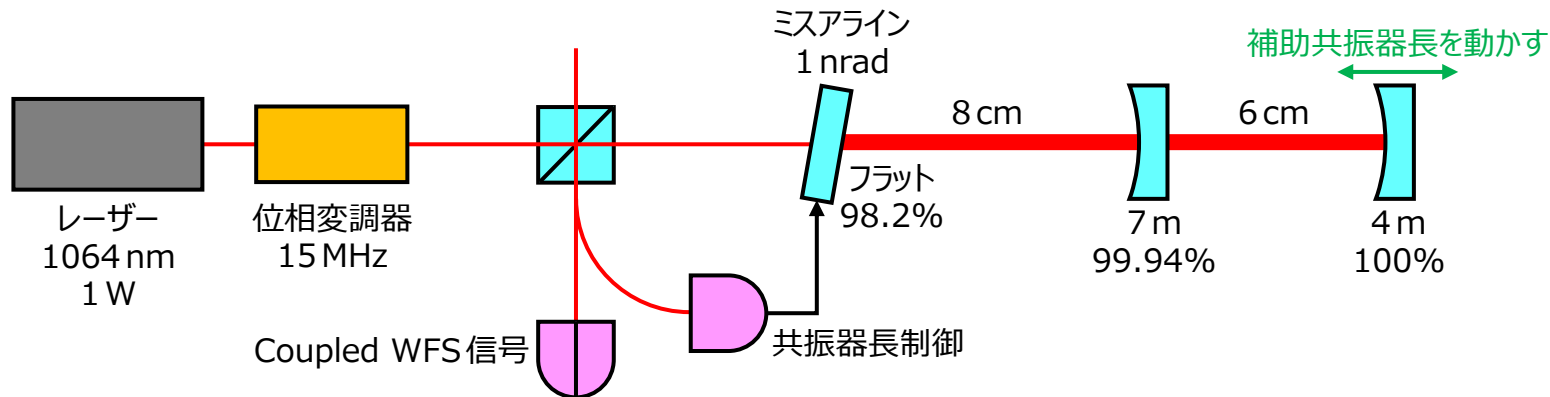
- 補助共振器で主共振器の Gouy 位相を打ち消し
00モードと10モードを同時に共振させる
→ 主共振器内で10モードが増幅される
→ WFSより大きな信号
- ビームジッター(入射光に混入した10モード)は増幅されない
→ ビームジッター雑音に対して信号雑音比が良い

FINESSEを用いたシミュレーション

- 目的
 - Coupled WFSの性質 (特に線形レンジ) を明らかにする
- 目標
 - Coupled WFSの信号がWFSより大きいことを確認する
 - Coupled WFSの線形レンジを計算する
- 方法
 - 線形レンジには解析解がない
→ 干渉計シミュレーションソフト FINESSE を使用
 - Coupled WFSを構築しパラメータを変えながらWFS信号を計算する

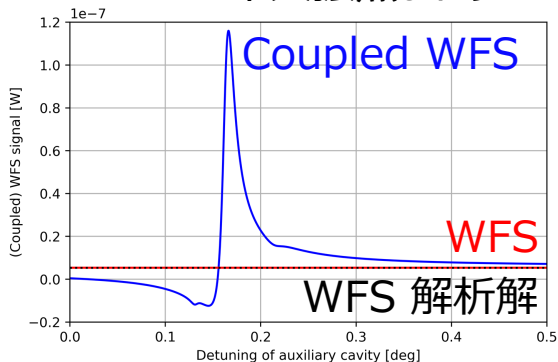


Coupled WFSの信号増幅

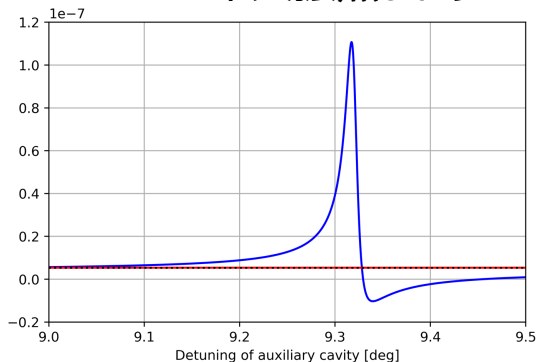


- 補助共振器の00モードと10モードの共振点まわりでWFSに比べて信号増幅

00モード共振点まわり

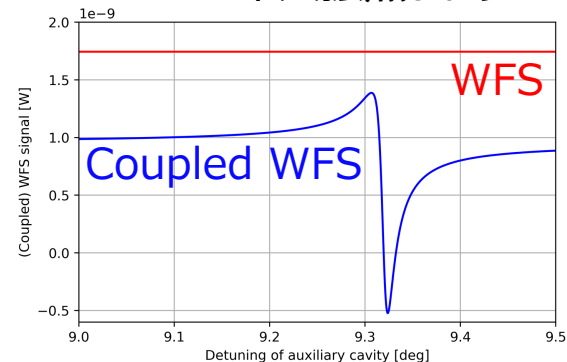


10モード共振点まわり



- フロントミラーを傾けずに入射光にビームジッターを混ぜた → 信号増幅しない

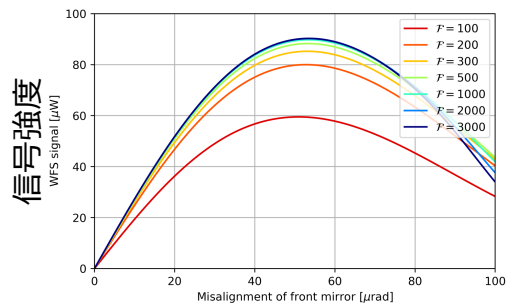
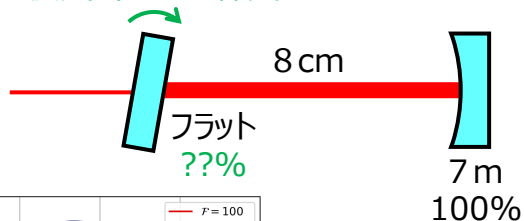
10モード共振点まわり



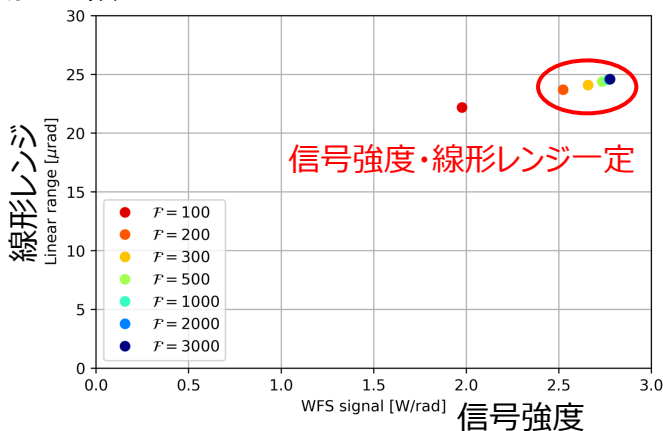
WFS・Coupled WFSの線形レンジ

WFS

ミスアライン量を増やす



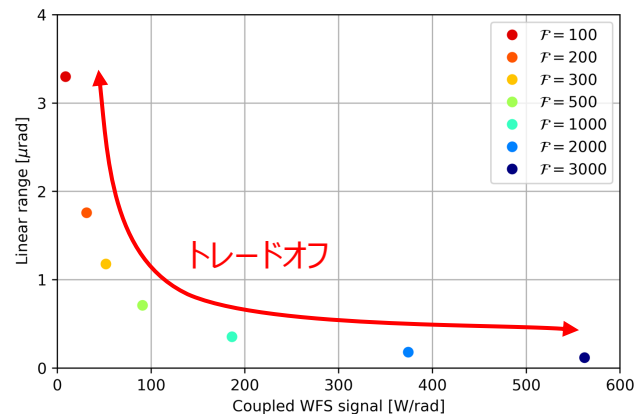
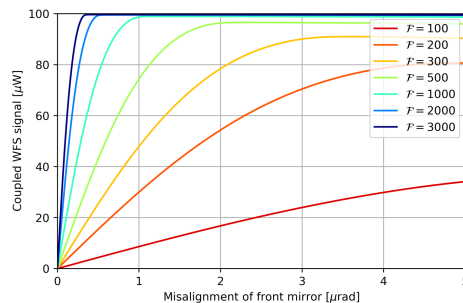
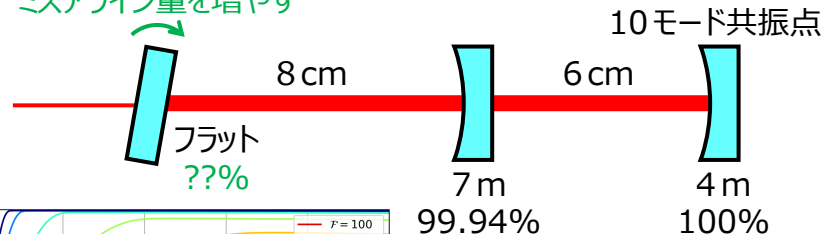
フロントミラーの傾き



- 信号強度と線形レンジは
フィネスに依存しない

Coupled WFS

ミスアライン量を増やす

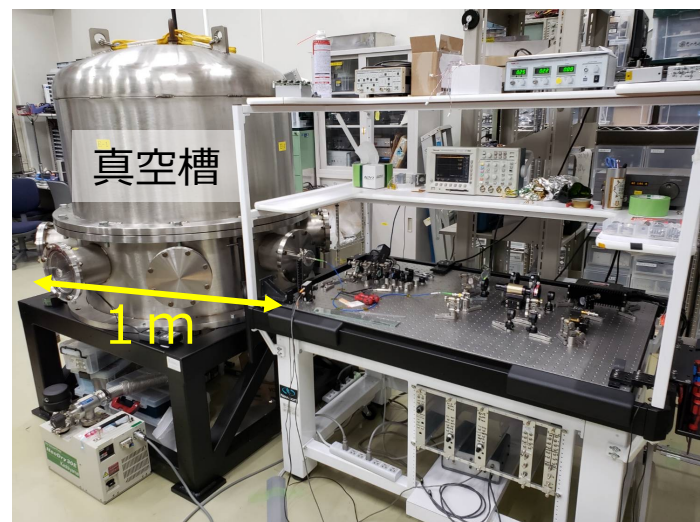
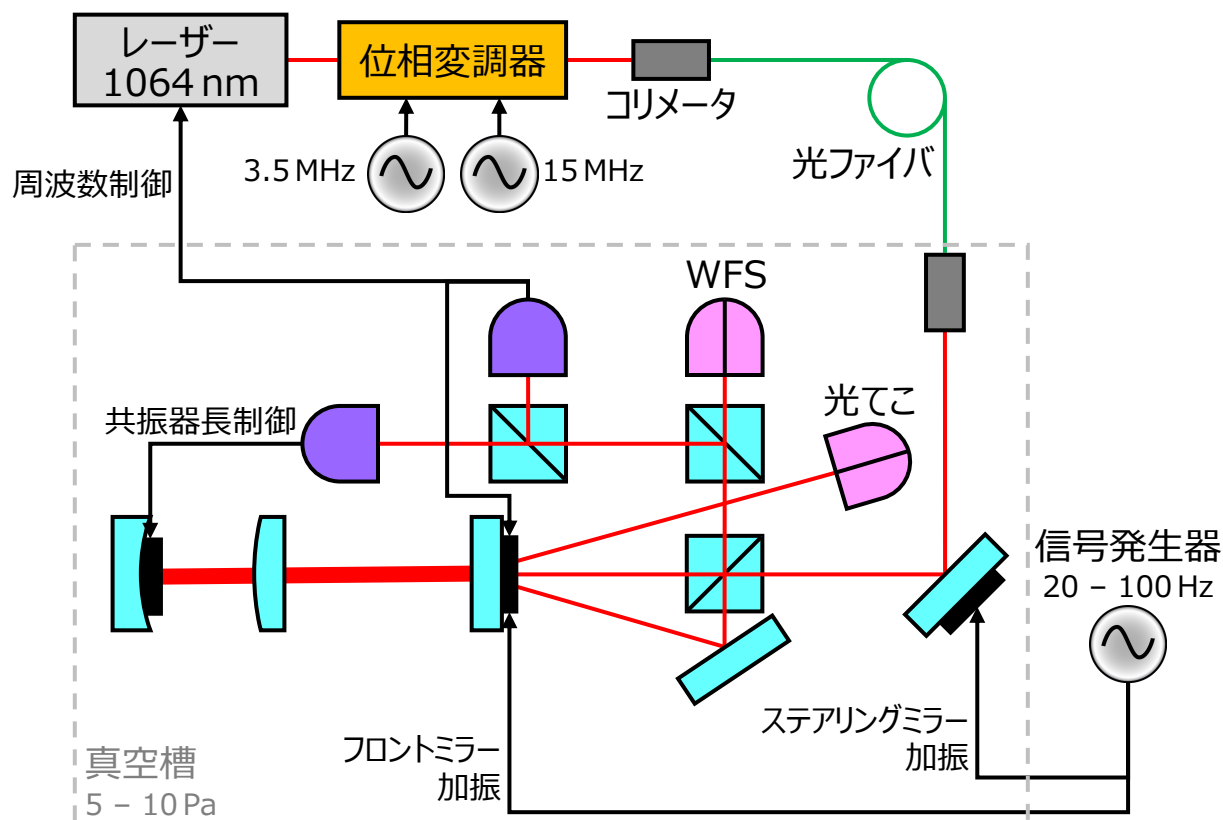


- フィネスが大きいほど信号強度が大きい
- フィネスが大きいほど線形レンジが小さい

原理実証実験

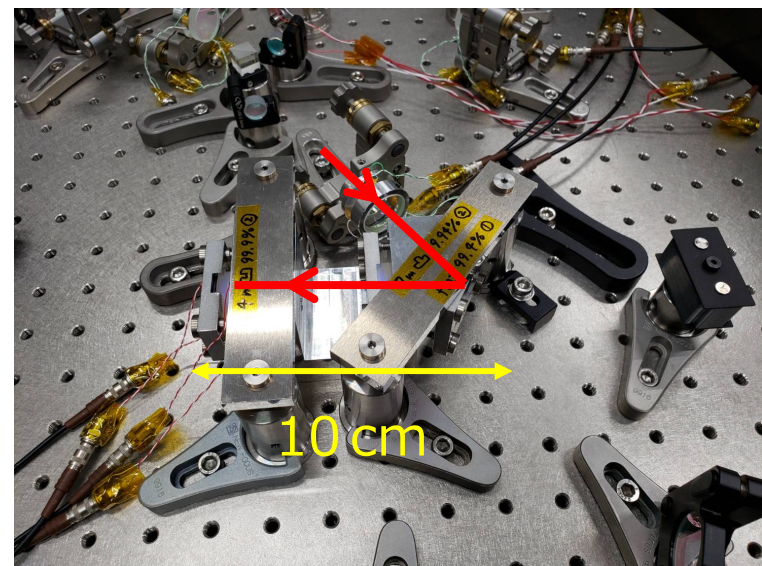
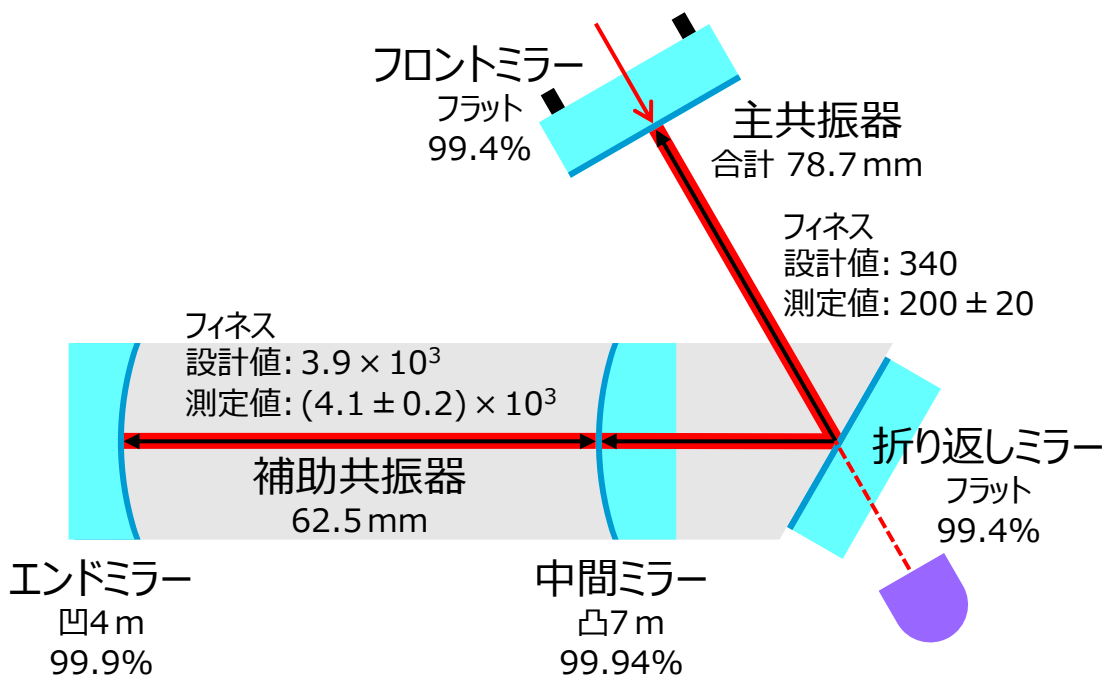
目的

- 信号増幅の定量的な評価
 - Coupled WFS 信号が WFS 信号より大きいことを実証
- 制御手法の確立
 - 主共振器・補助共振器ともに PDH 法で共振点に制御



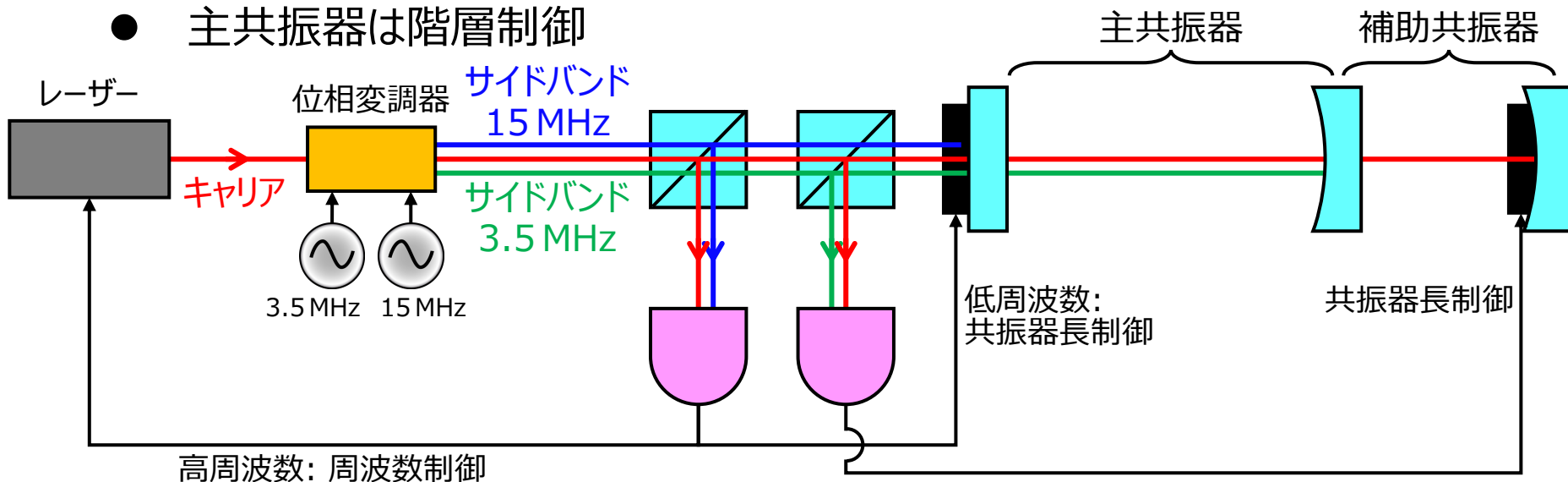
共振器の設計

- Phase-III TOBA の要求値に近づけつつ実験しやすいパラメータを選択
- 主共振器の状態をモニタできるように折り返す
- 位相補償には補助共振器の反射率・ロスが重要
 - HRコーティングを向かい合わせ
 - 0.1% のロスがあっても位相補償できるようにパラメータ設計
- アライメント安定化のためフロントミラー以外はスペーサーに固定
→ 数日間経ってもアライメントは大きく悪化しない



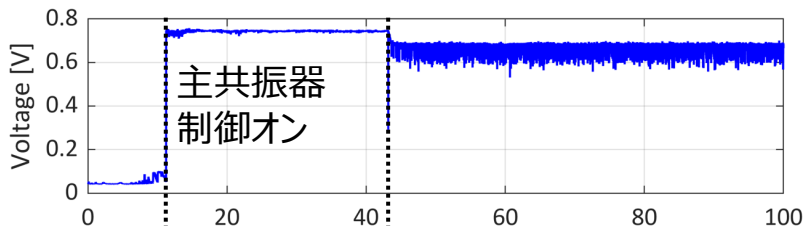
共振器制御の手法・結果

- 2つの変調周波数を用いてPDH法で制御
- 主共振器は階層制御

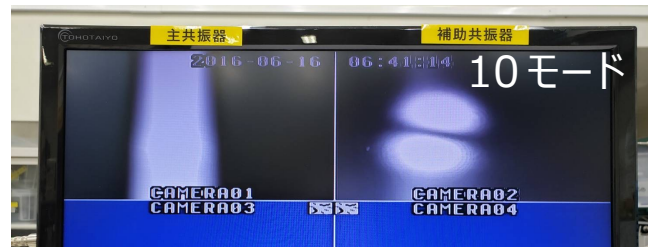
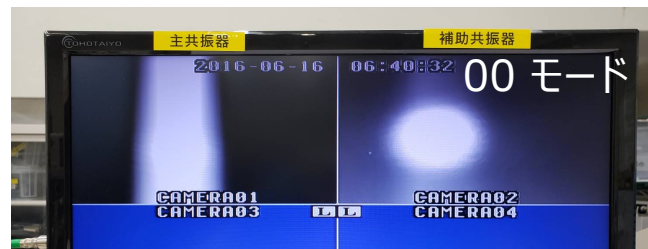
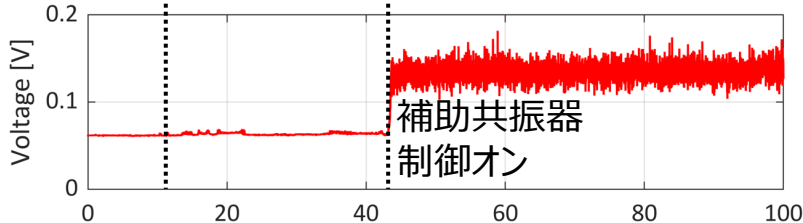


透過光をカメラで見た様子

主共振器の透過光

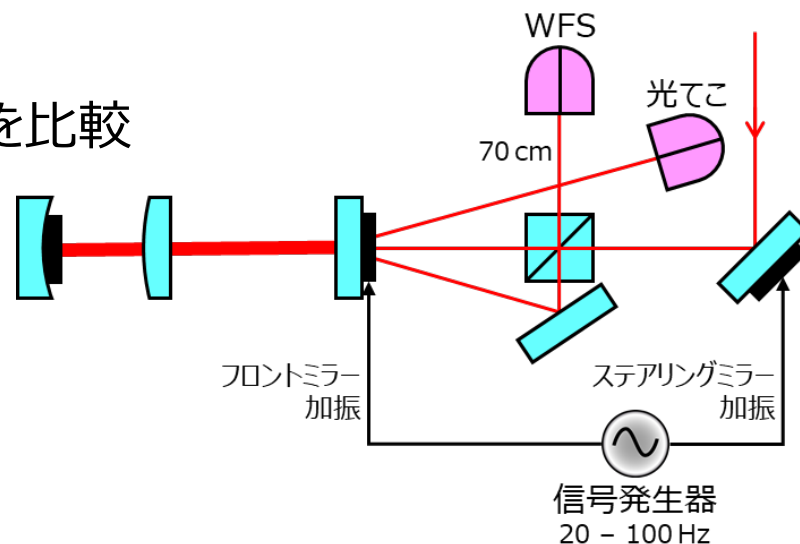


補助共振器の透過光



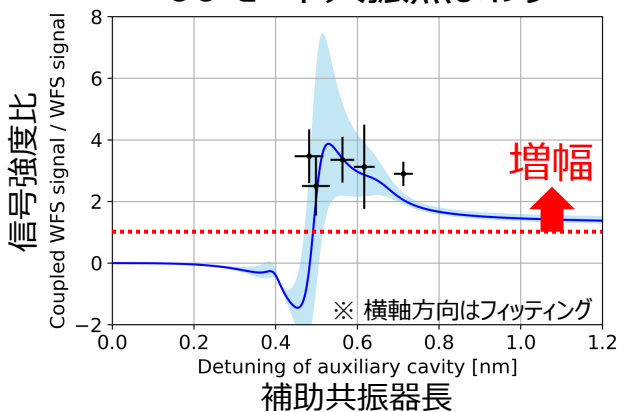
角度信号・ビームジッター応答の測定結果

- 光てこ信号を使って校正
→ WFSとCoupled WFSの信号強度を比較
- 補助共振器の透過光量から
Coupled WFSの制御点を校正

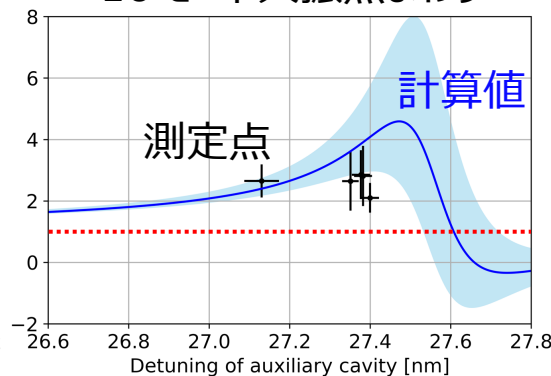


- フロントミラーを角度方向に揺らす
→ WFSに比べて信号増幅

00モード共振点まわり

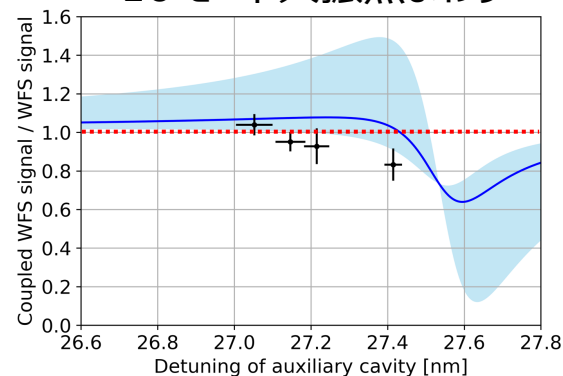


10モード共振点まわり



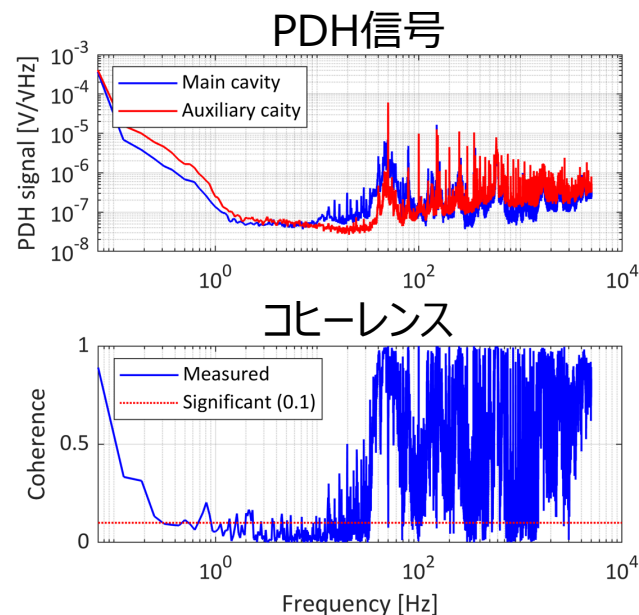
- 入射光にビームジッターを混ぜる
→ ビームジッターは増幅しない

10モード共振点まわり



考察・セットアップの改良

- 制御の安定性
 - 主共振器の長さ変動が周波数制御を介して補助共振器に伝わり制御が不安定
 - ピエゾ素子の寄生共振を取り除き高周波まで制御をかける
- 信号強度の測定精度
 - 光検出器の位置精度が悪く信号強度の測定精度が悪い
 - 光検出器の位置精度を上げる・個数を増やして較正する



まとめ

- ねじれ振り子型重力勾配計TOBAを開発中
 - 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指して提案された
 - 現在は Phase-III TOBA を開発中
 - 今よりも早い地震速報も実現できる

- TOBA の角度センサとして結合光共振器を用いた wavefront sensor (Coupled WFS) が考案された
 - シミュレーションにより信号強度・線形レンジを初めて評価した
 - 原理実証実験により制御手法の確立・信号増幅の評価を行った
 - 制御の安定化・信号強度の測定精度の向上を図っている