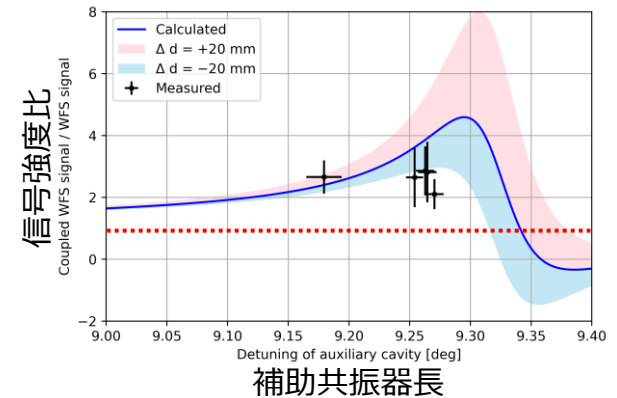
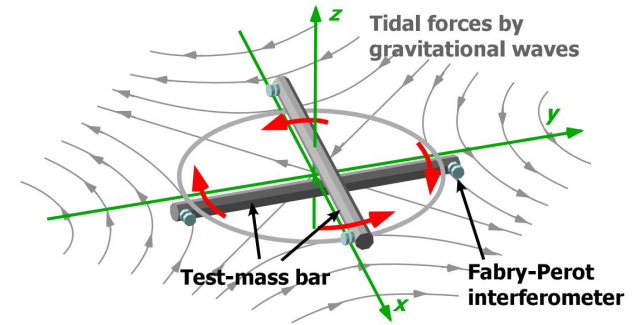


ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (31): 高感度 wavefront sensor の原理実証

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

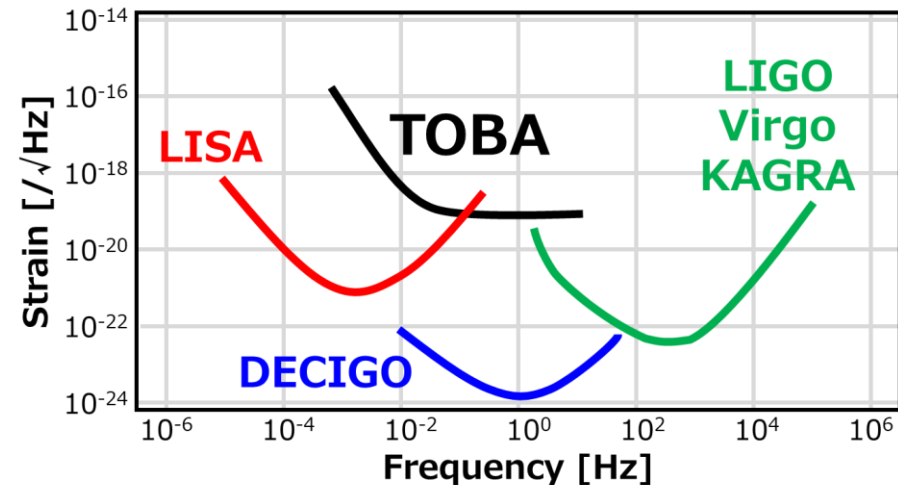
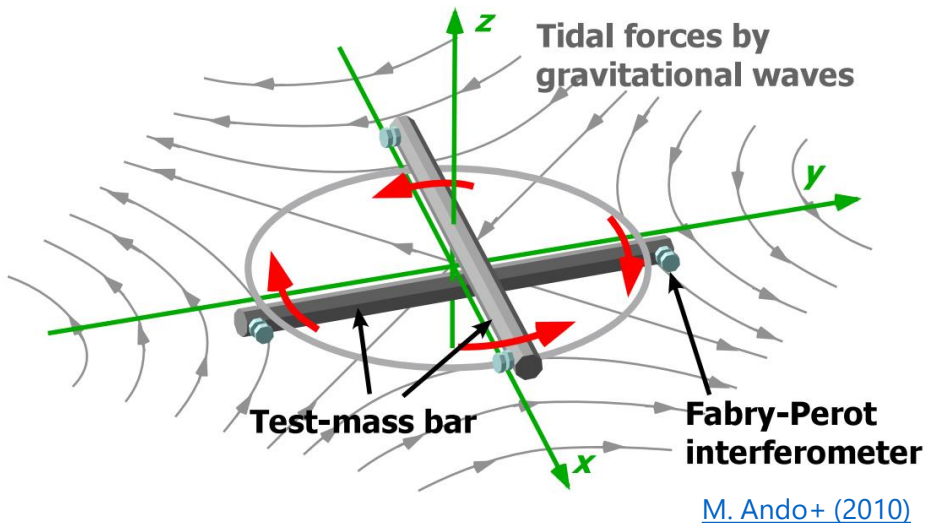
概要

- ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA で 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- 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
 - 角度信号が大きい
 - ビームジッター雑音が小さい
- 本研究では Coupled WFS の 原理実証実験を行った
 - シミュレーションによる信号強度の計算
 - 制御手法の確立
 - 角度信号増幅の定量的な評価



ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA

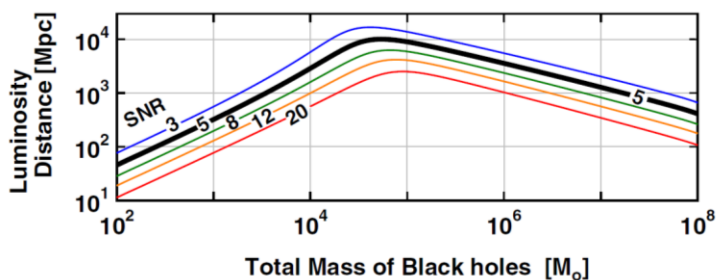
- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスで潮汐力によるねじれ回転を検出
- ねじれ振りの共振周波数は低い (~ 1 mHz)
 - 地上で低周波数に高感度
- 宇宙打ち上げの技術開発・コストが不要
- 地上のためメンテナンスが簡単
- 地上ならではのサイエンス



TOBA で得られるサイエンス

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

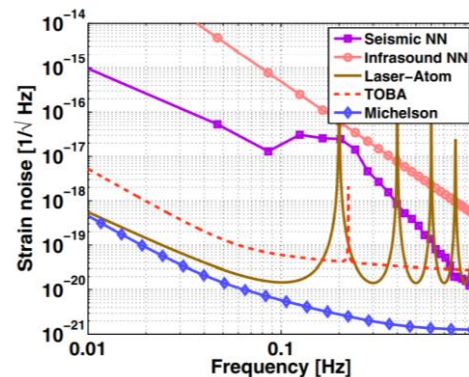


[M. Ando+ \(2010\)](#)

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

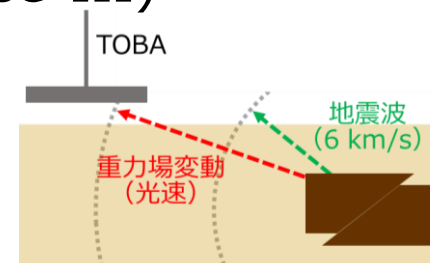
重力勾配計として

- 重力勾配雑音
モデル検証・非定常雑音
→ 第3世代検出器の雑音低減



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

- 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



TOBA 開発の流れ

Phase-I

Phase-II

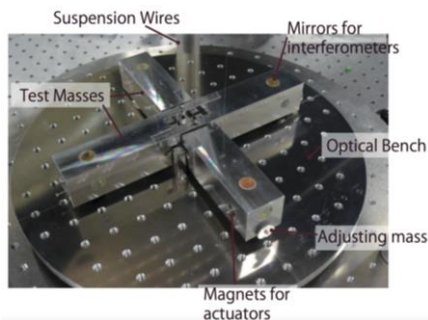
現在

Phase-III

Final

原理実証

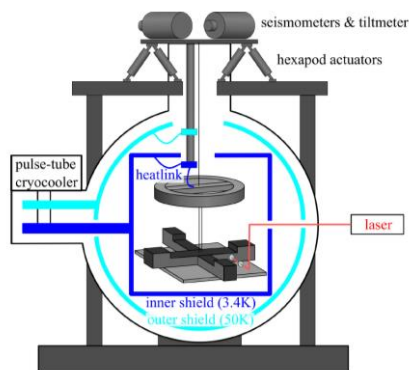
$10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ (達成)
20 cm 試験マス
室温



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

要素開発・雑音低減

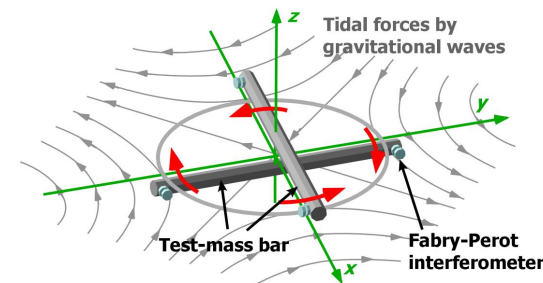
$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
35 cm 試験マス
低温 (4 K)



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

本観測

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

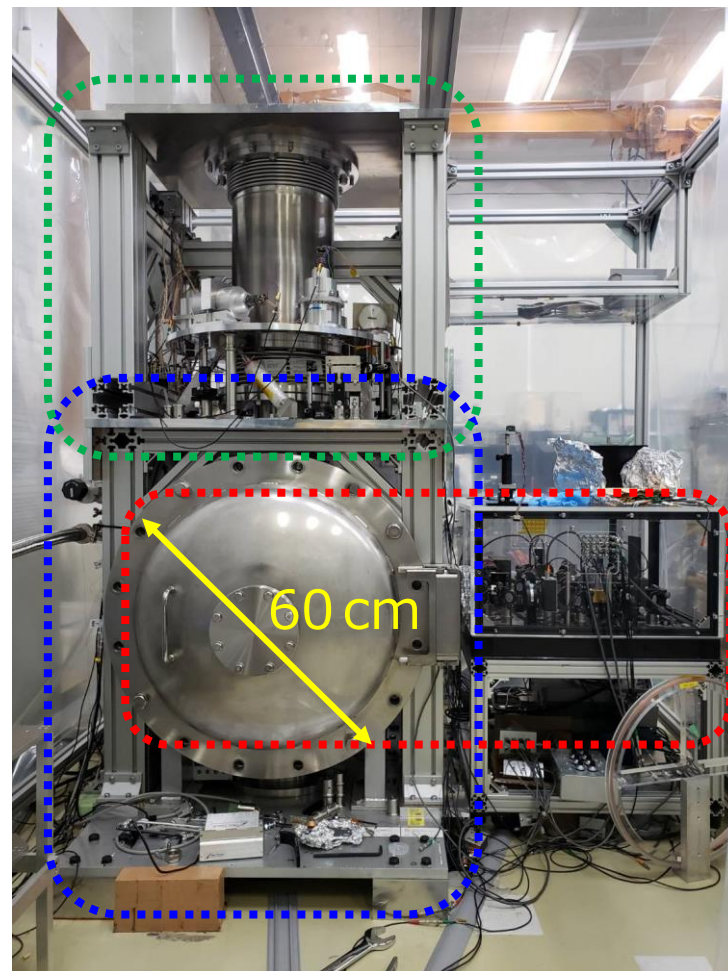
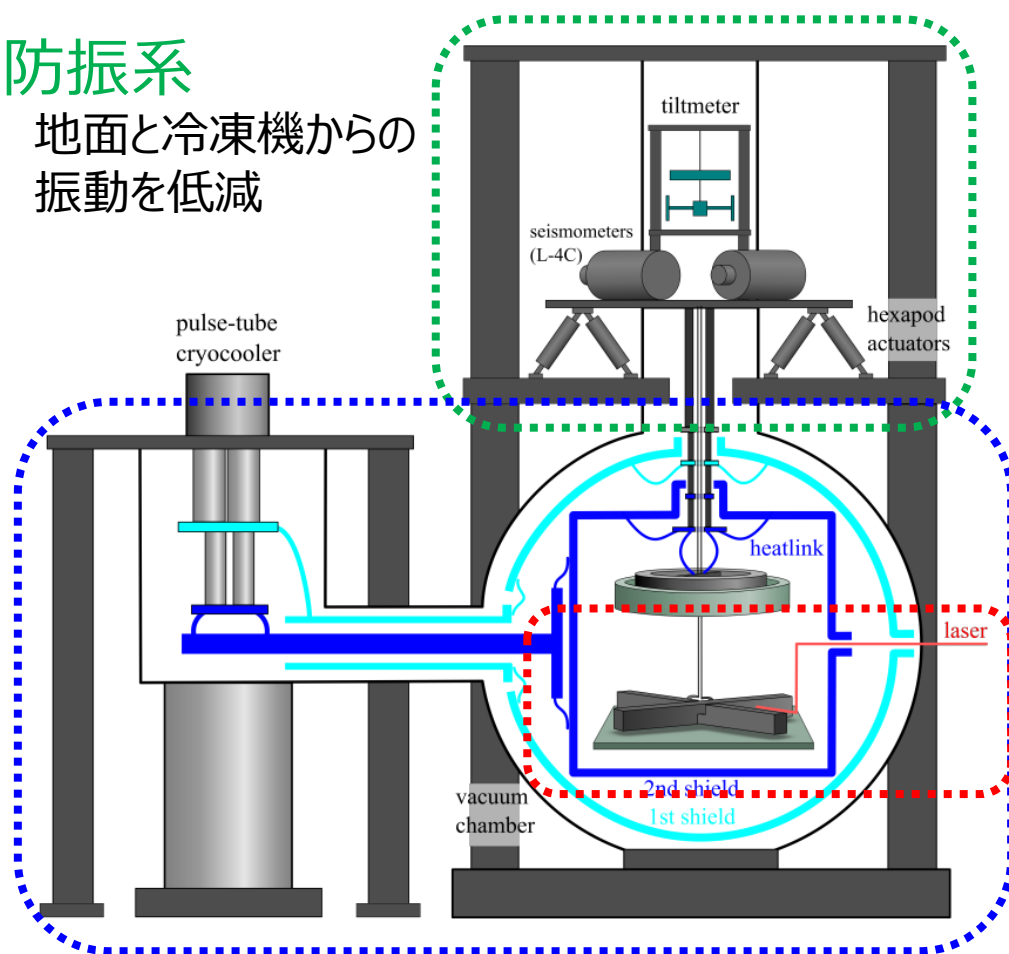


Phase-III TOBAの構成

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



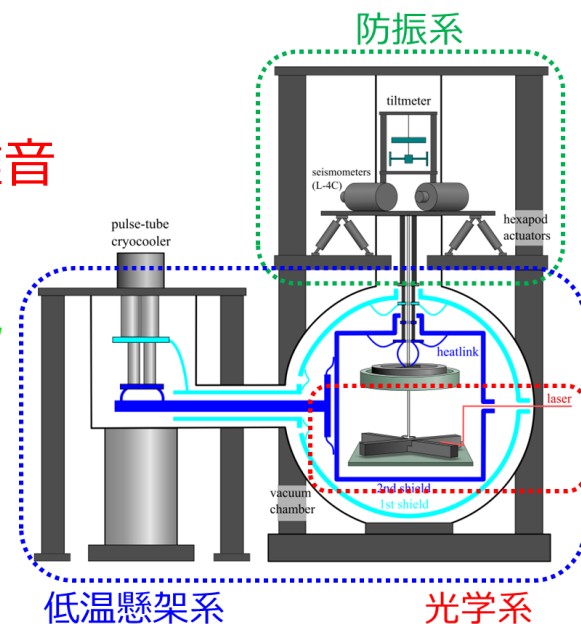
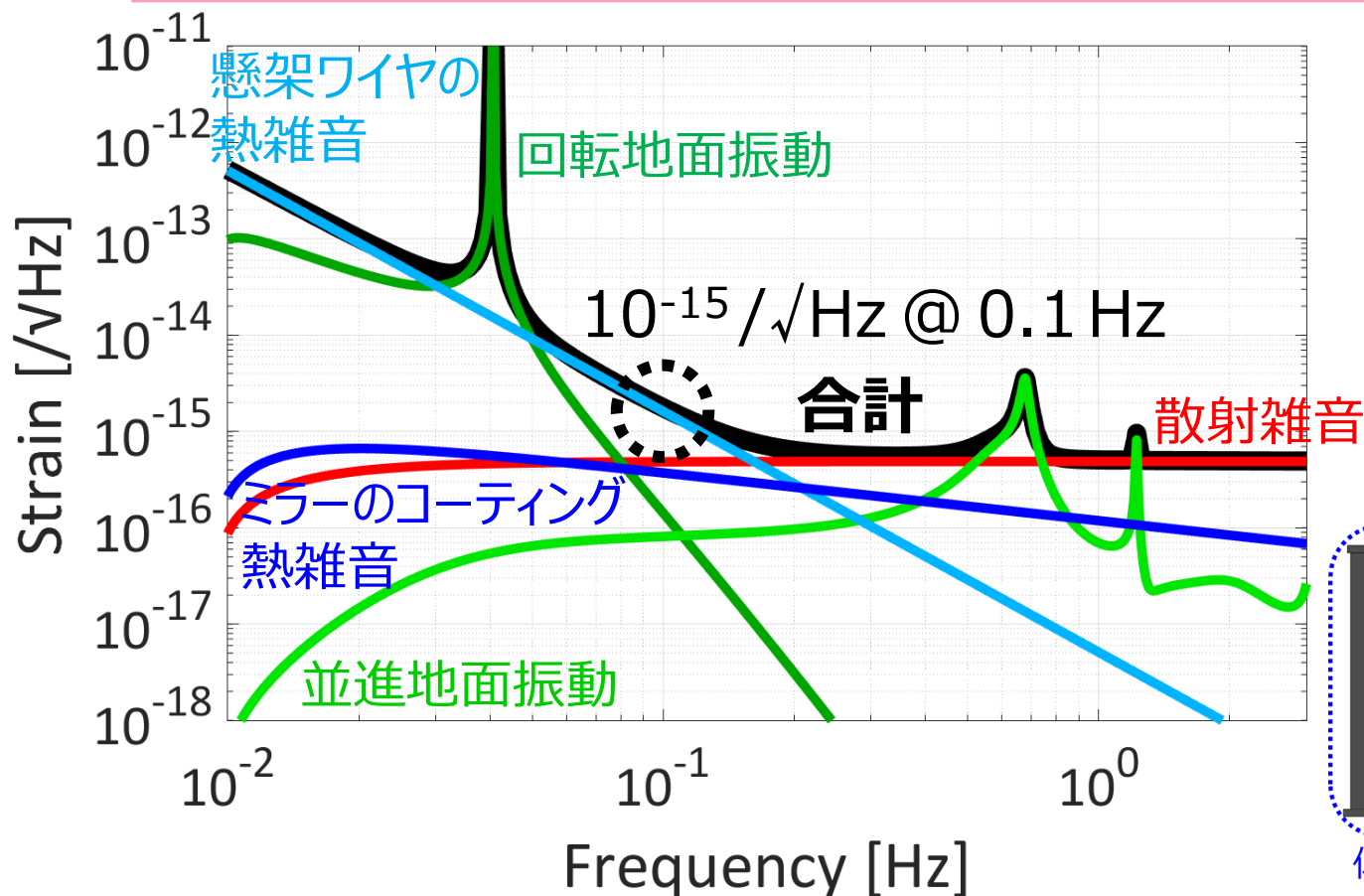
低温懸架系

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

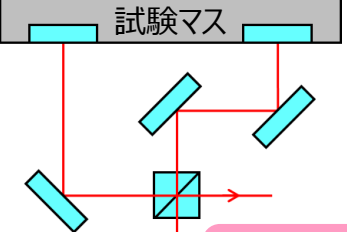
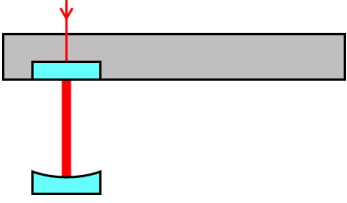
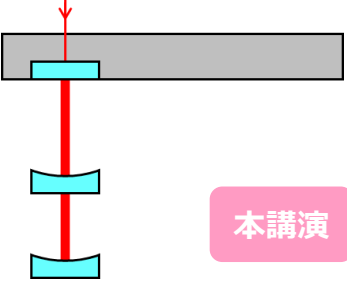
Phase-III TOBA の目標感度・開発項目



- **低温懸架系**：低温で高いQ値をもつ懸架ワイヤ → Ooiさんの講演
- **低温 + 防振 + 光学系**：低温モリシック光学系 → 高野さんの講演
- **光学系**：高感度な角度センサ (Coupled WFS) **本講演**

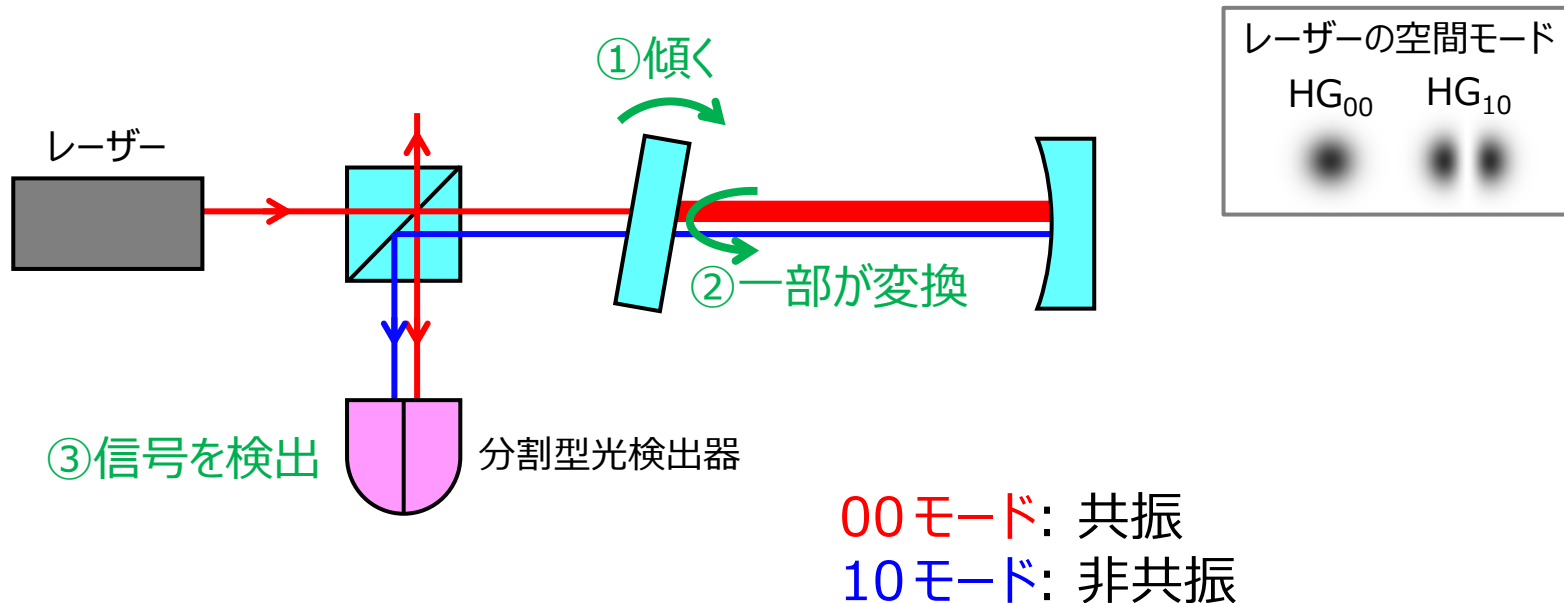
角度センサの比較

- 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): $5 \times 10^{-16} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$

	マイケルソン干渉計  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

Wavefront sensorの原理

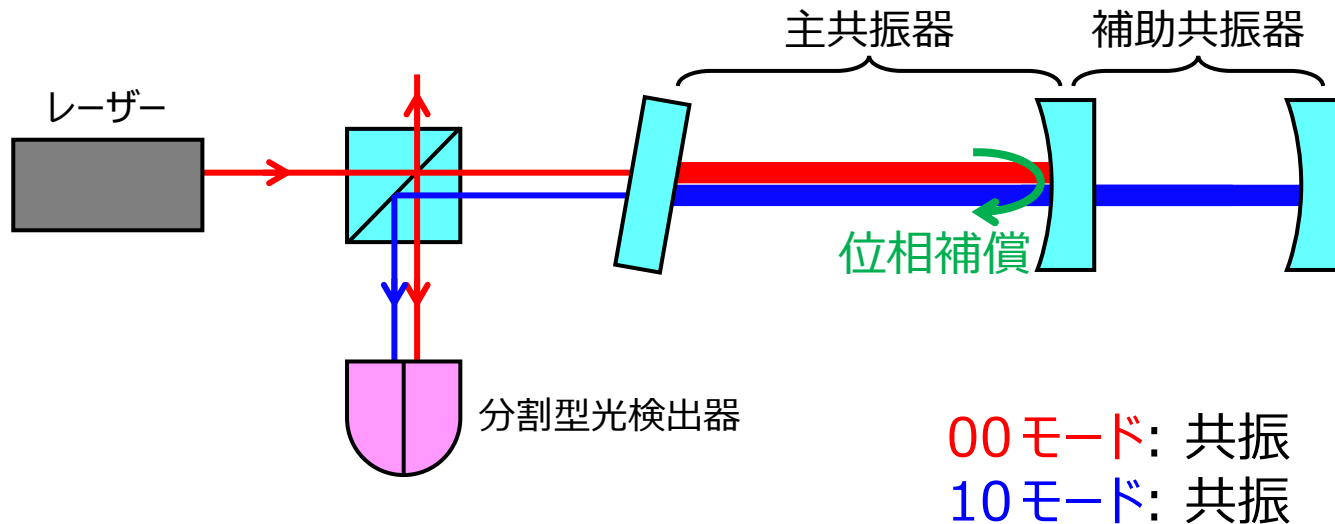
- WaveFront Sensor (WFS): 光共振器を用いた角度センサ
- ミラーの傾きで 10モードが生まれる
- 00モードと 10モードの干渉を検出
- 左右の信号の差をとる → 傾き量に比例した WFS 信号



- 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

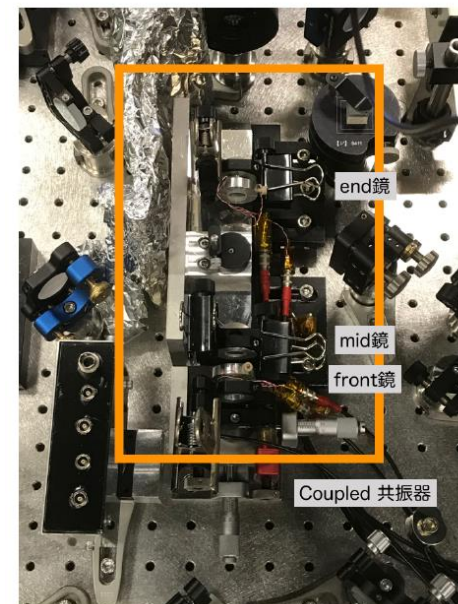
- Coupled WFS:
結合光共振器 (coupled cavity) を用いた WFS



- 補助共振器による位相補償で主共振器の 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

先行研究の課題

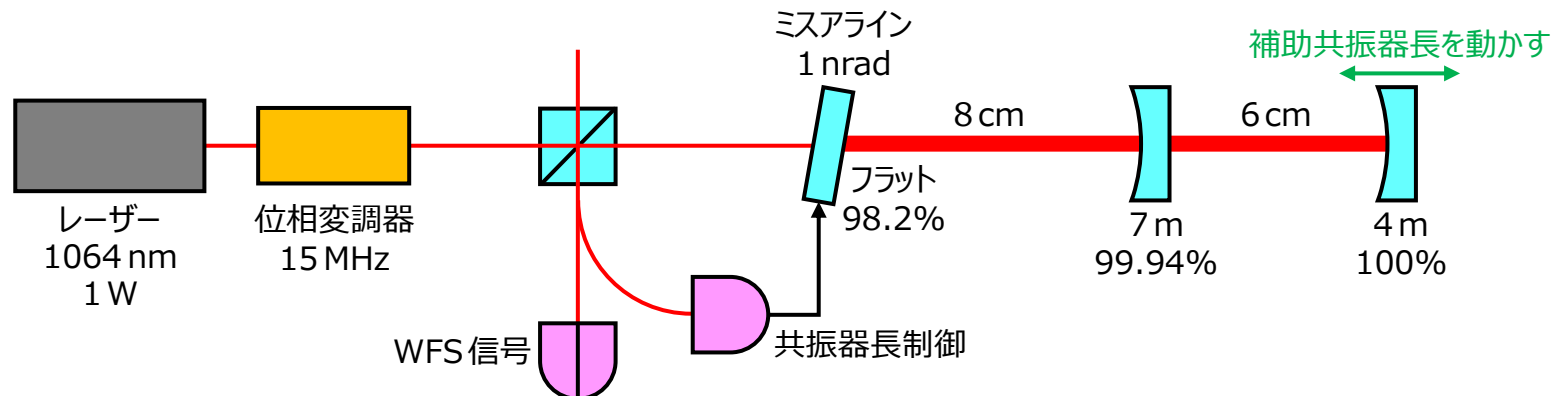
- 😊 原理実証実験により
Coupled WFSの信号増幅を確認した
- 😞 TOBAへの導入に向けて課題が残っている
 - 信号強度の計算
 - 制御手法の確立
 - 信号増幅の定量的な評価⇒ 解決を目指す



宮崎祐樹 修士論文 (2019)

Coupled WFSの信号増幅の計算

- Coupled WFSの構成は複雑 → シミュレーションソフト FINESSE を使用



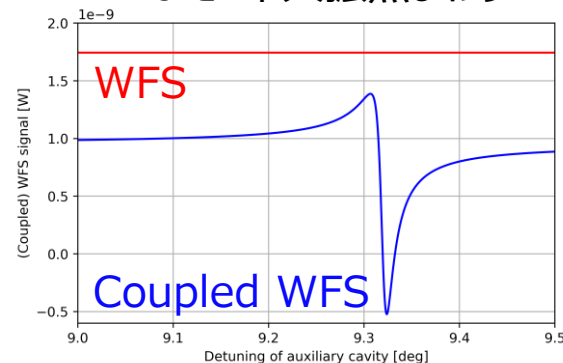
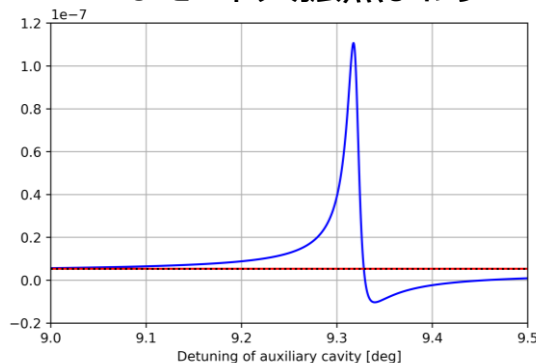
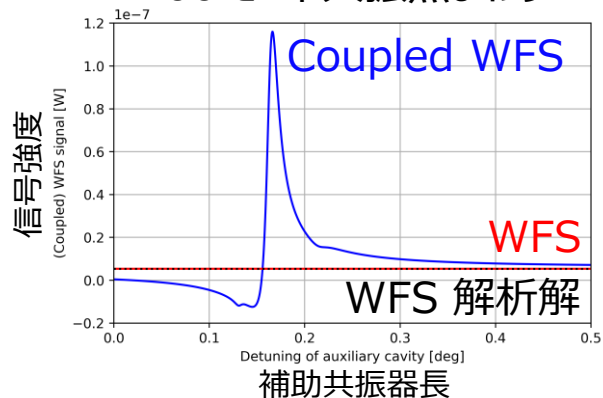
- 補助共振器の00モードと10モードの共振点まわりでWFSに比べて信号増幅

- 入射光にビームジッターを混ぜた → 信号増幅しない

00モード共振点まわり

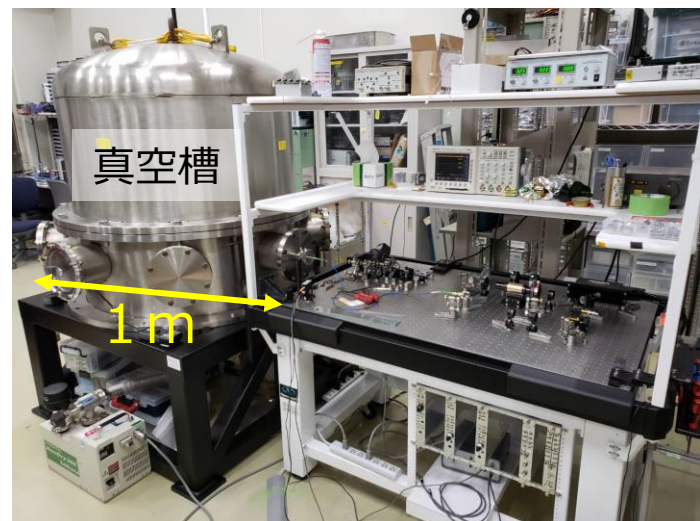
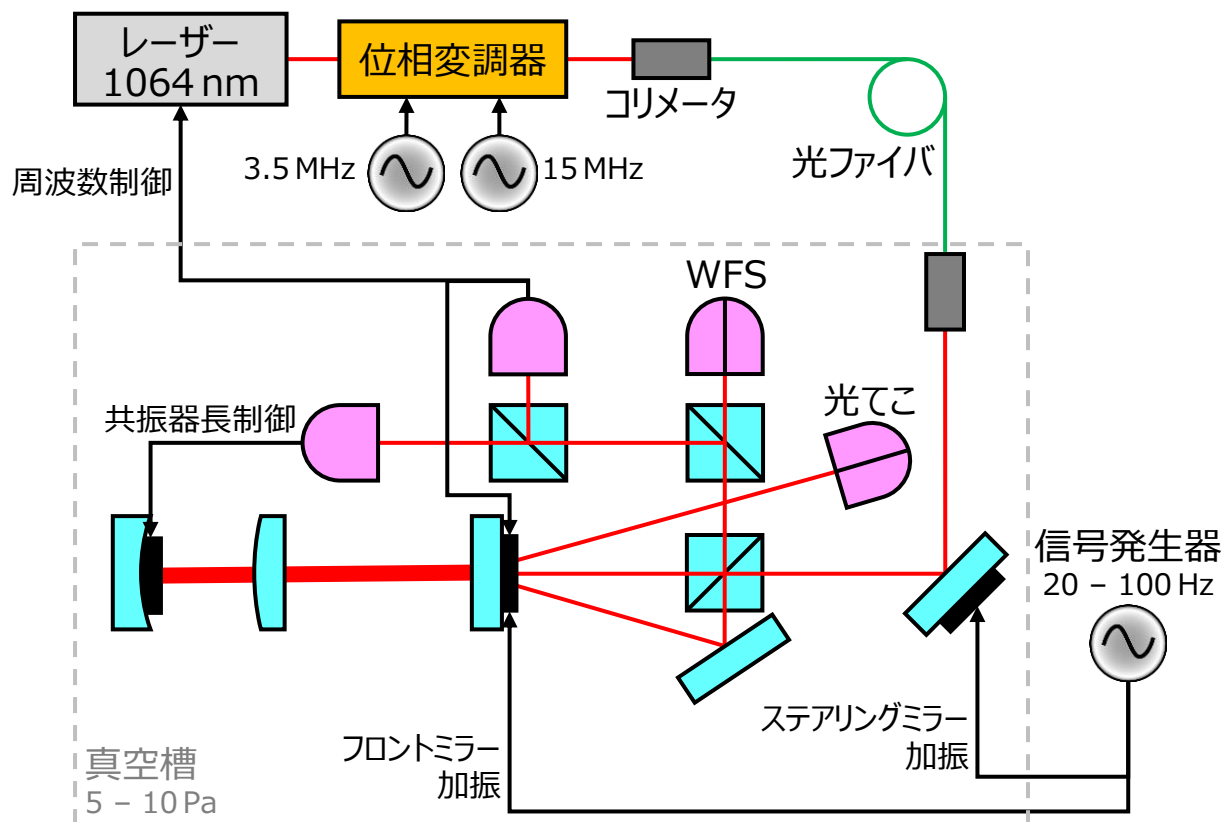
10モード共振点まわり

10モード共振点まわり



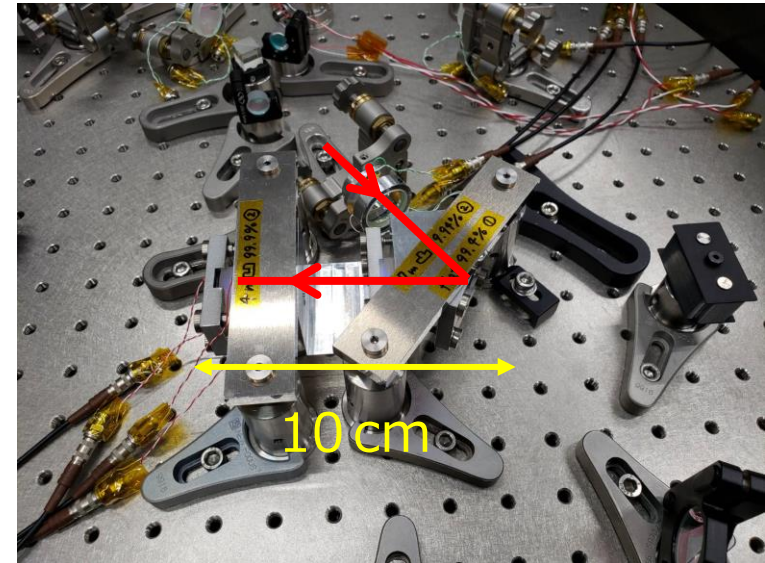
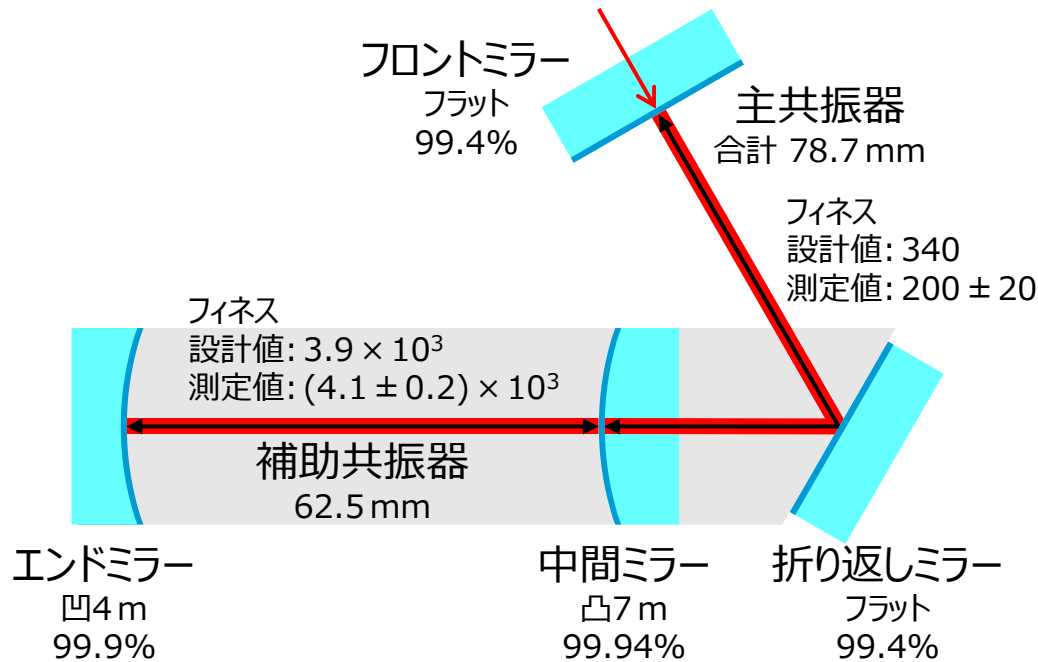
原理実証実験

- 信号増幅の定量的な評価
 - 共振器のアラインメントが変化しにくい構成で製作
 - 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



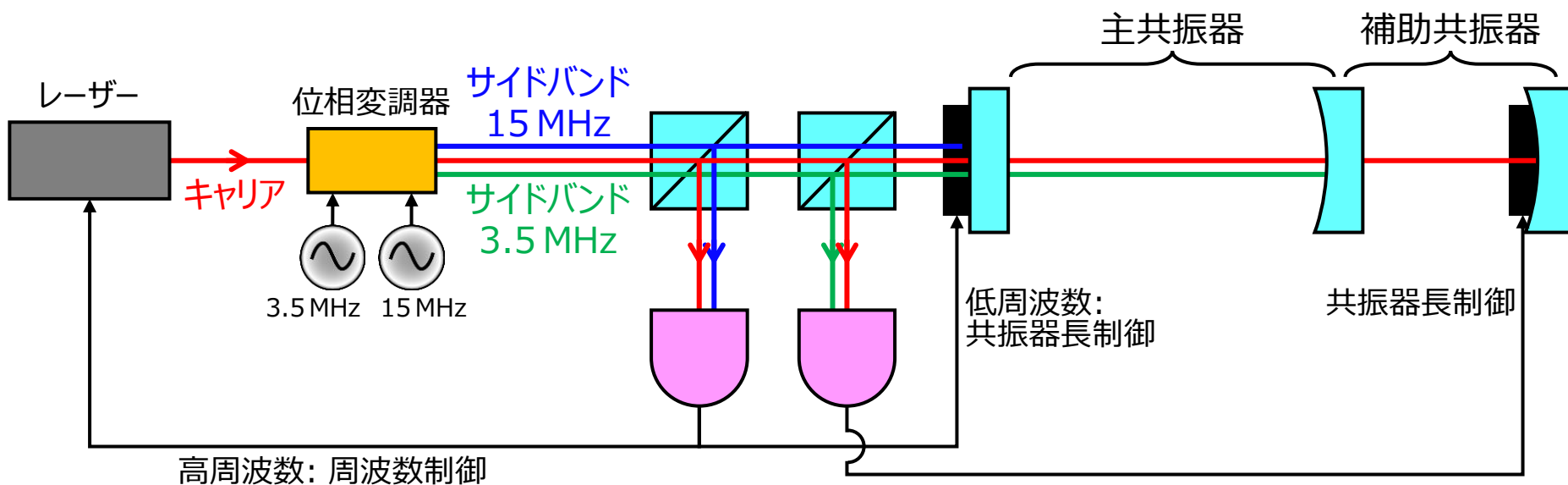
共振器の設計

- 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ミラーの反射率・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

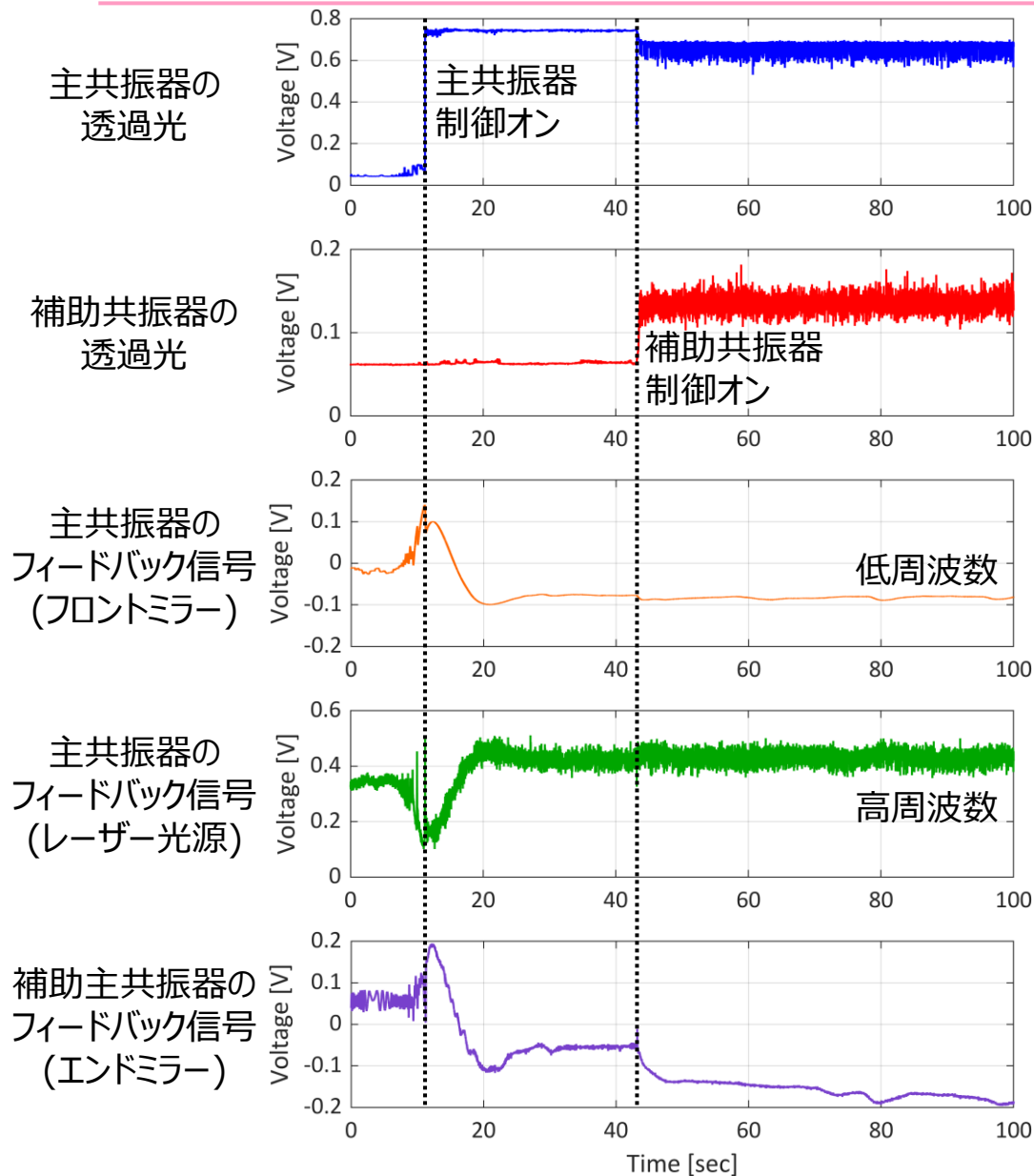


共振器の制御手法

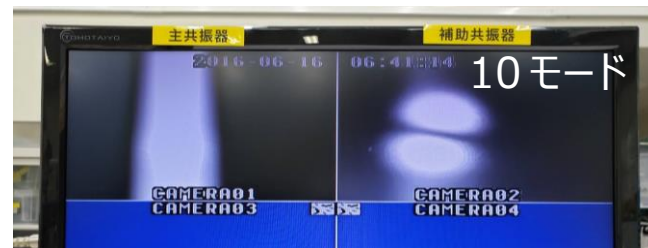
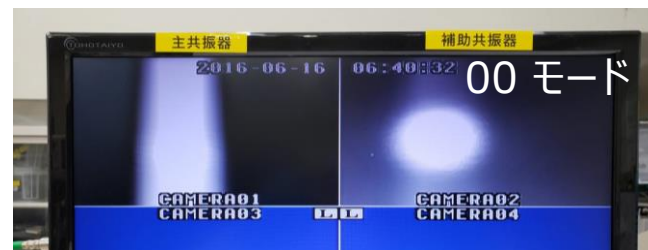
- 2つの変調周波数を用いてPDH法で制御
 - 15 MHz: 主共振器用
 - 3.5 MHz: 補助共振器用
- 主共振器は階層制御
 - レーザー周波数を介して主共振器の外乱が補助共振器に伝わるのを防ぐため



共振器制御の結果

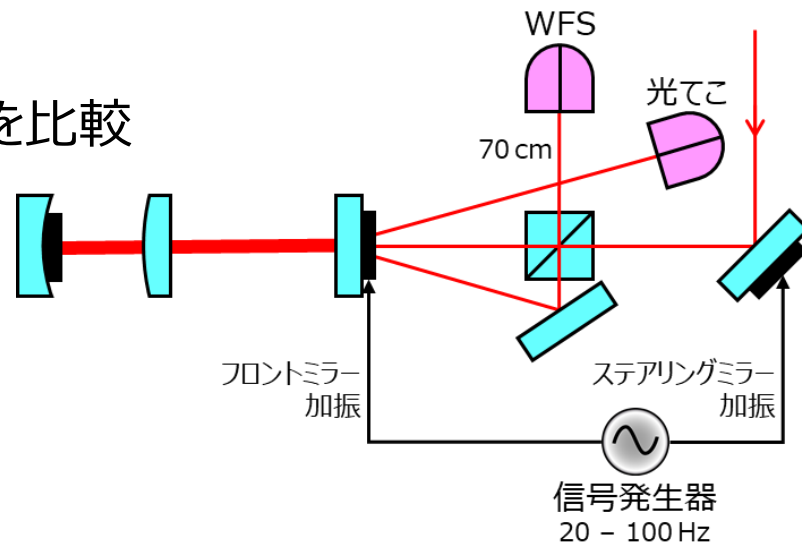


透過光をカメラで見た様子



角度信号・ビームジッター応答の測定結果

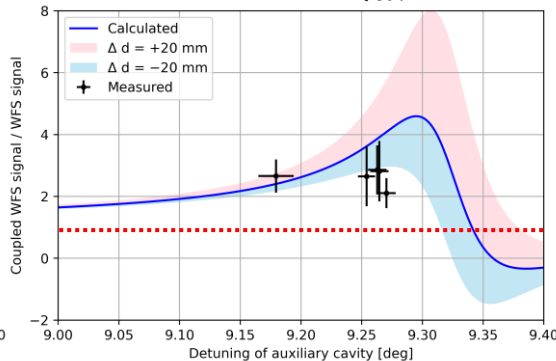
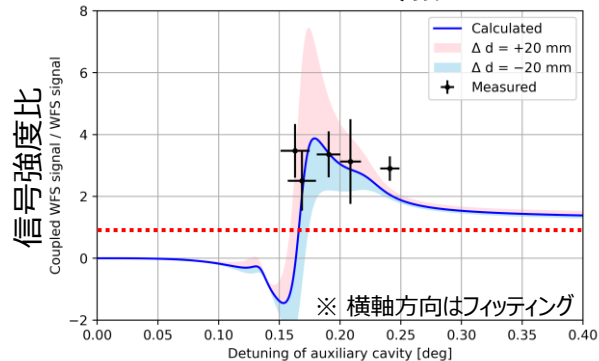
- 光てこ信号を使って校正
→ WFSとCoupled WFSの信号強度を比較
- 補助共振器の透過光量から
Coupled WFSの制御点を校正



- 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

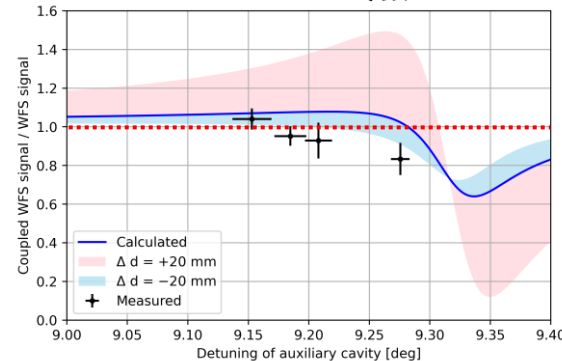
10モード共振点まわり



補助共振器長

- 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

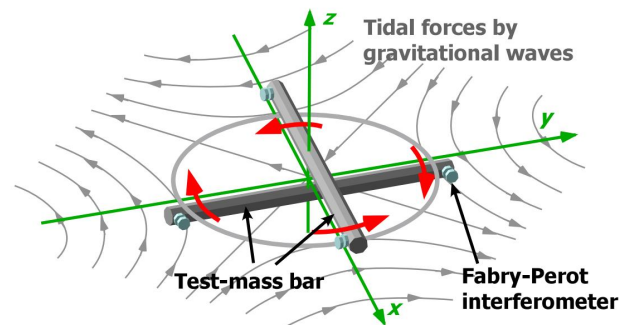
10モード共振点まわり



- 検出器の位置が2 cm ずれているとき計算値と測定値が一致する

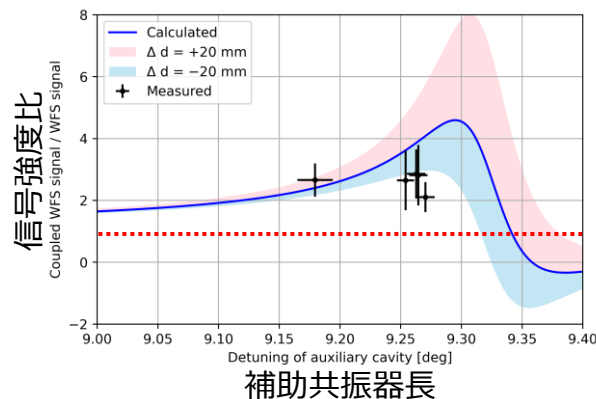
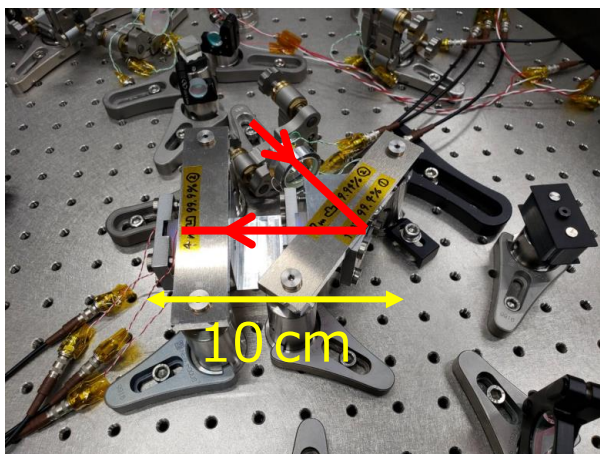
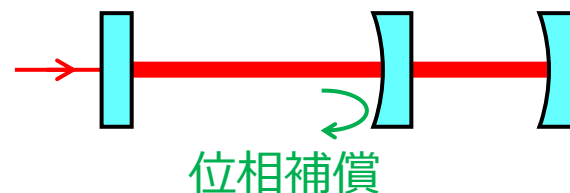
まとめ

- ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA で
0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- 現在は Phase-III TOBA を開発中



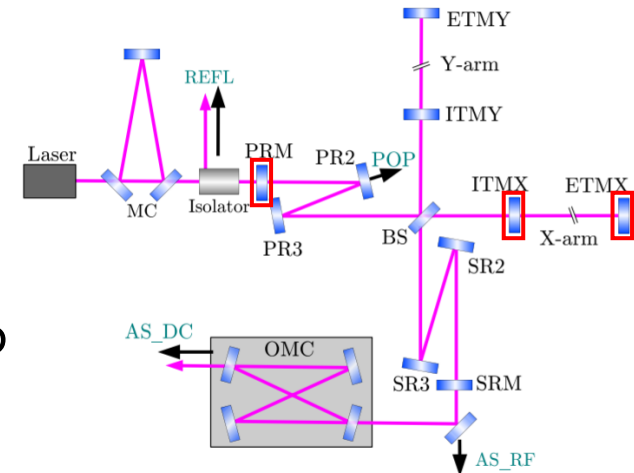
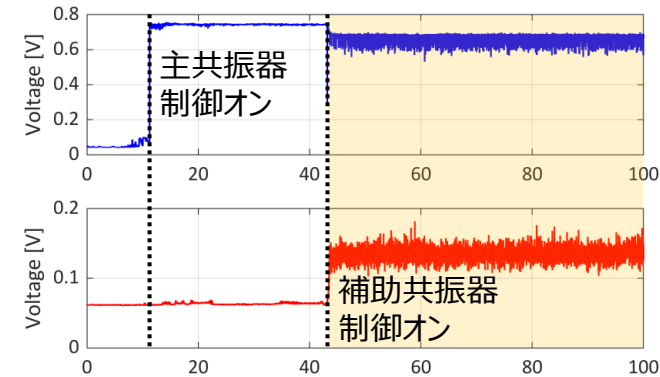
- TOBA の角度センサとして考案された
Coupled WFS の原理実証実験を行った

- シミュレーションによる信号強度の計算
- Coupled WFS の製作・PDH 法による制御の実現
- 角度信号増幅とビームジッターへの応答の定量的な実証



今後の展望

- 制御の安定化
 - フロントミラーを振り子で吊る構成に変更
 - 共振器の固有モードのカップリングの改善
- TOBA への導入
 - 要求値を満たす設計の考案
 - 雑音の低減
- さらに複雑な構成のシミュレーション
 - KAGRA などの WFS 信号にも応用できる



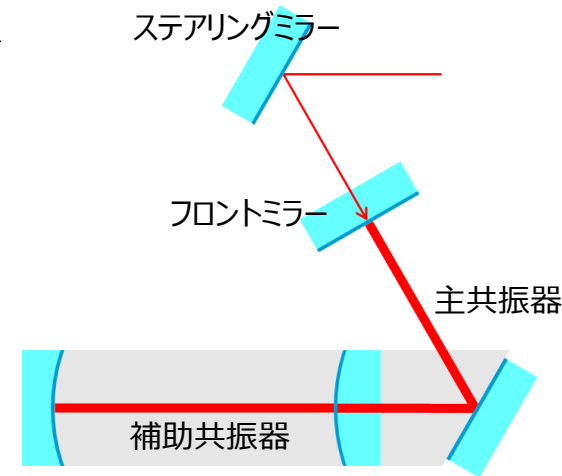
Y. Aso+ (2013)

予備スライド

考察 1: 共振器の固有モードのカップリング

● 現在の問題点

- フロントミラーを置いた後は補助共振器のアラインメントを調整していない
 - 2つの共振器の固有モードのカップリングが悪く
補助共振器の10モードの光量が多い
 - 主共振器内の光量が減少するため
補助共振器の共振点に制御できない
 - 共振点から少しずれた点に制御がかかり
透過光量が1次でふらついている



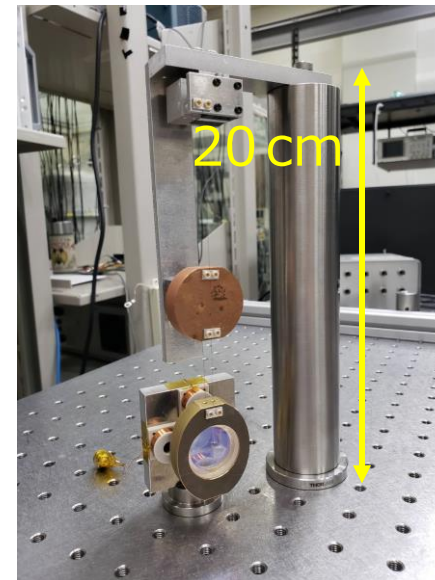
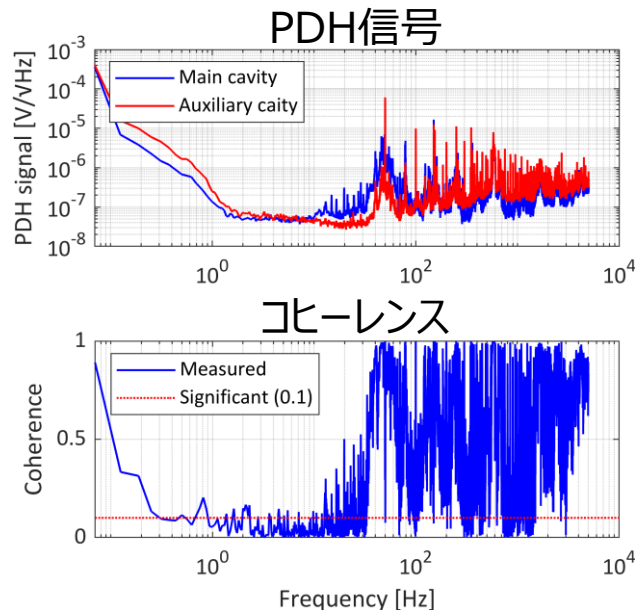
● 解決方法

- ステアリングミラーとフロントミラーのアラインメントを調整して共振器の固有モードのカップリングを改善
 - 補助共振器の10モードの光量を減らす
- ただし PDH 信号が小さくなるので制御のゲインを大きくする必要がある



考察 2: 補助共振器の制御の安定性

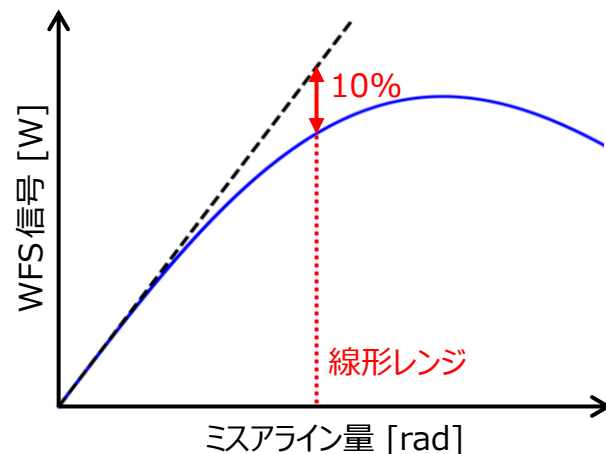
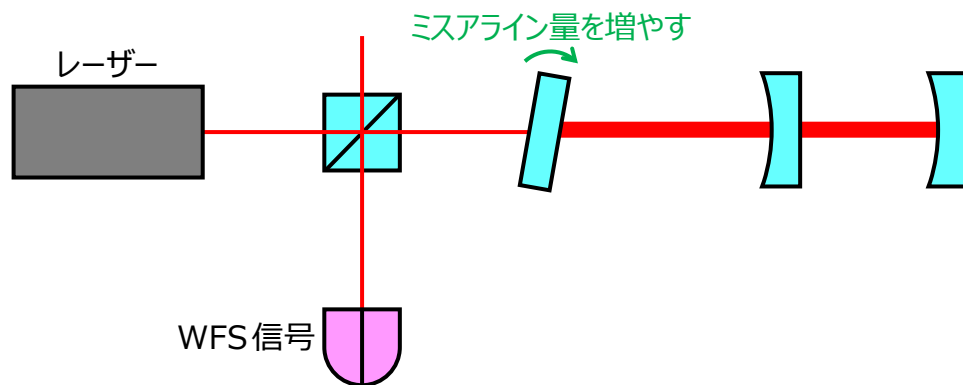
- 現在の問題点
 - 2つの共振器のPDH信号は40 Hz以上で相関をもっている
→ 高周波数帯までフィードバック信号を返せず制御が不安定
- 解決方法
 - フロントミラーを振り子で吊って防振し
主共振器の高周波数帯での外乱を小さくする (設計・製作済み)
 - 主共振器のフィードバック信号をフロントミラーに返し
PDH信号の高周波数帯における相関を小さくする



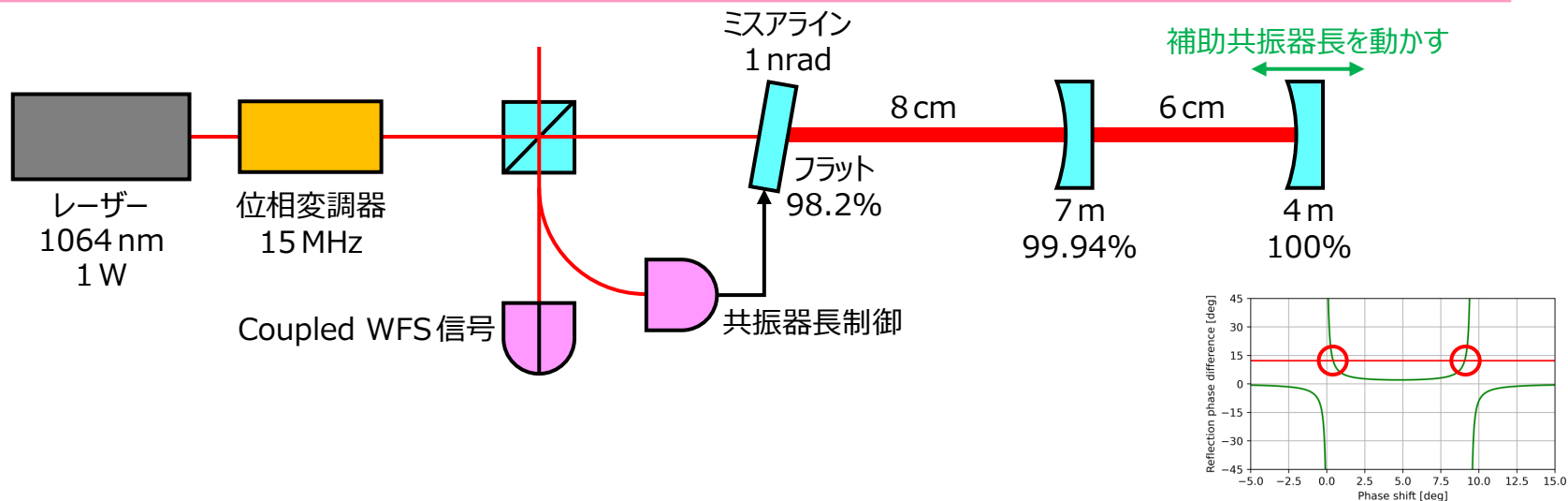
FINESSE を用いたシミュレーション



- 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



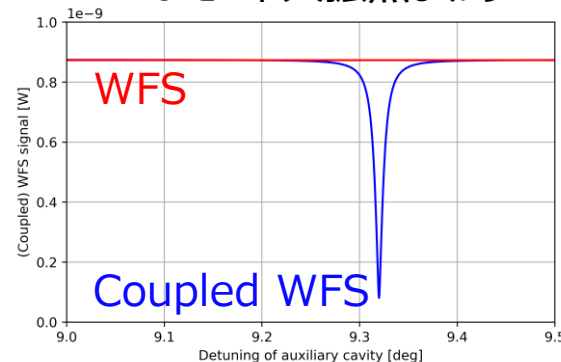
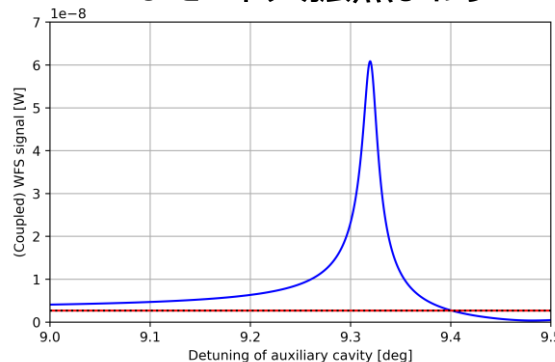
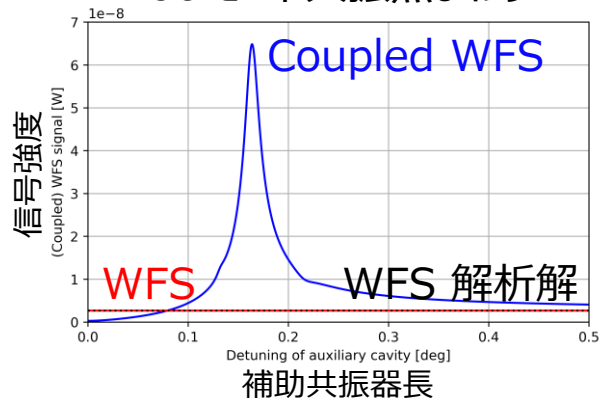
- 補助共振器の00モードと10モードの共振点まわりでWFSに比べて信号増幅

- 入射光にビームジッターを混ぜた → 信号増幅しない

00モード共振点まわり

10モード共振点まわり

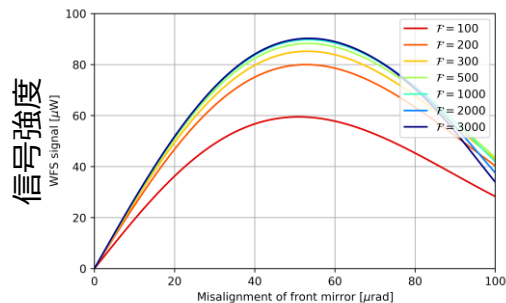
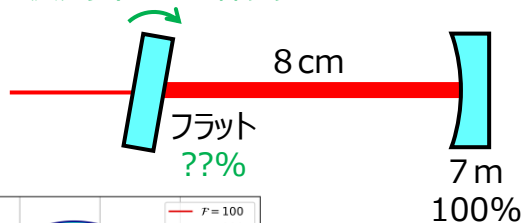
10モード共振点まわり



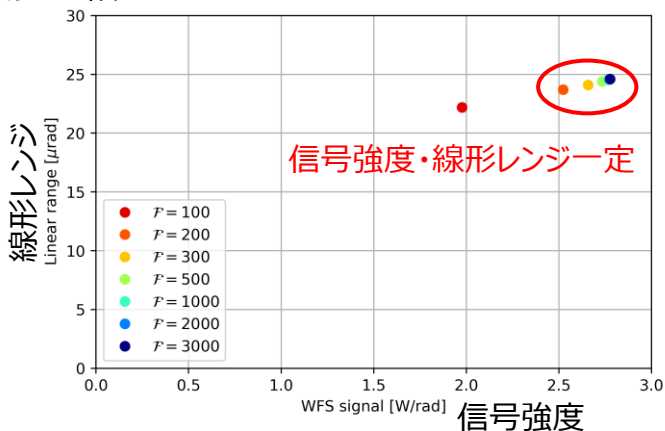
WFS・Coupled WFSの線形レンジ

WFS

ミスアライン量を増やす



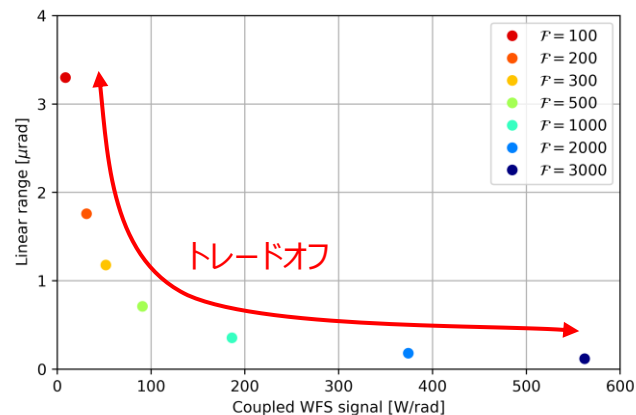
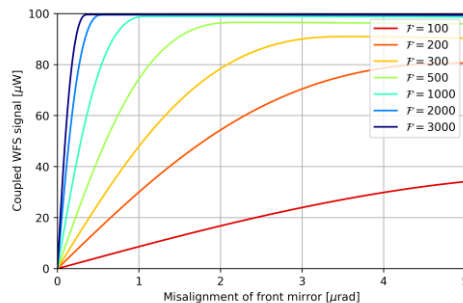
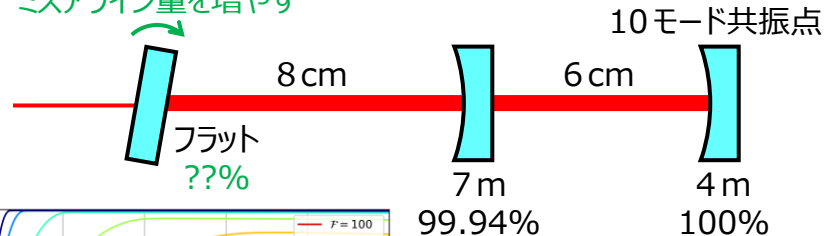
フロントミラーの傾き



- 信号強度と線形レンジは
フィネスに依存しない

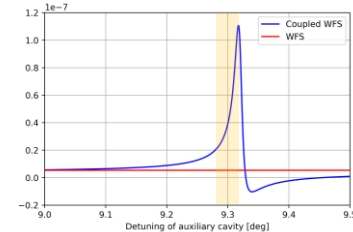
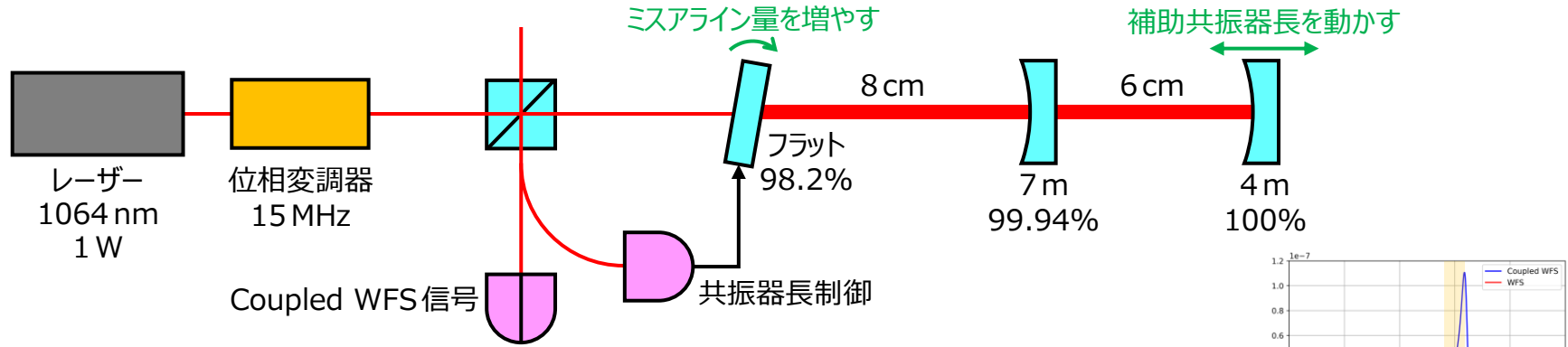
Coupled WFS

ミスアライン量を増やす

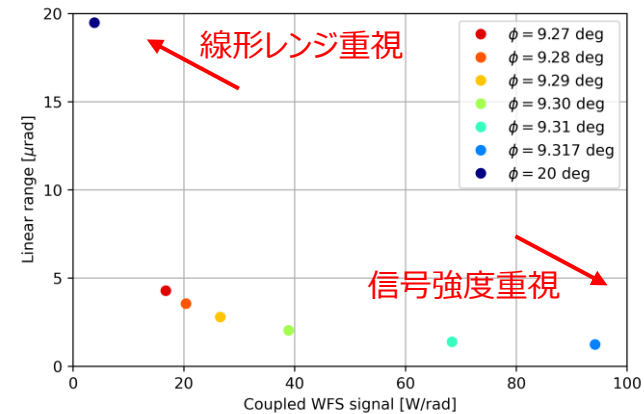
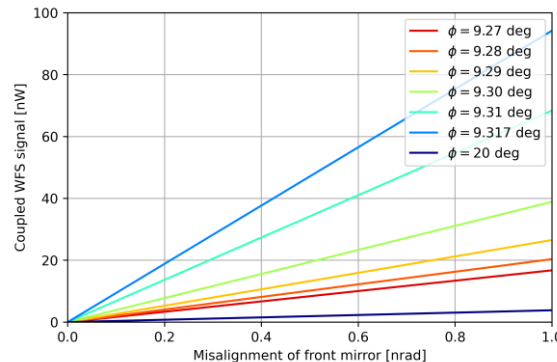
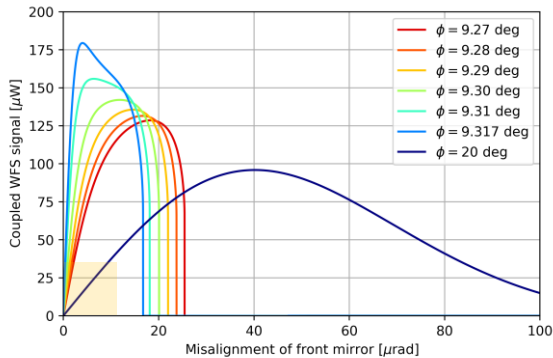


- フィネスが大きいほど信号強度が大きい
- フィネスが大きいほど線形レンジが小さい

Coupled WFSの制御点



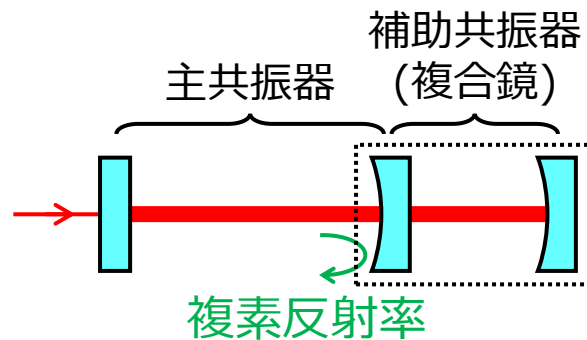
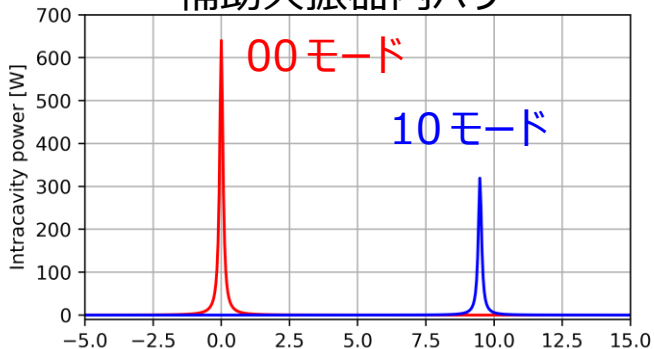
- 補助共振器の制御点を変えることで Coupled WFSの信号強度と線形レンジを選ぶことができる
→ 1つの装置で様々な応答を示すセンサとして便利



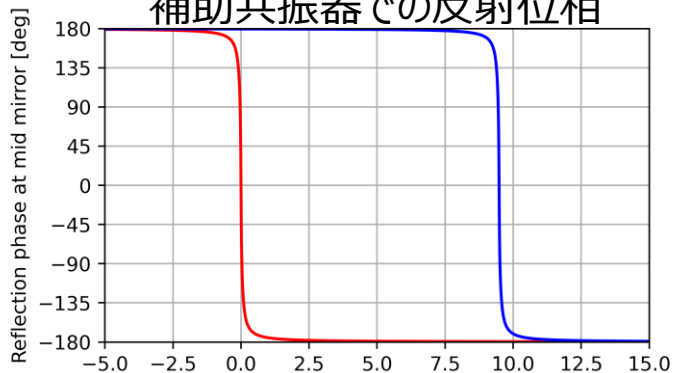
追加

補助共振器による位相補償

補助共振器内パワー

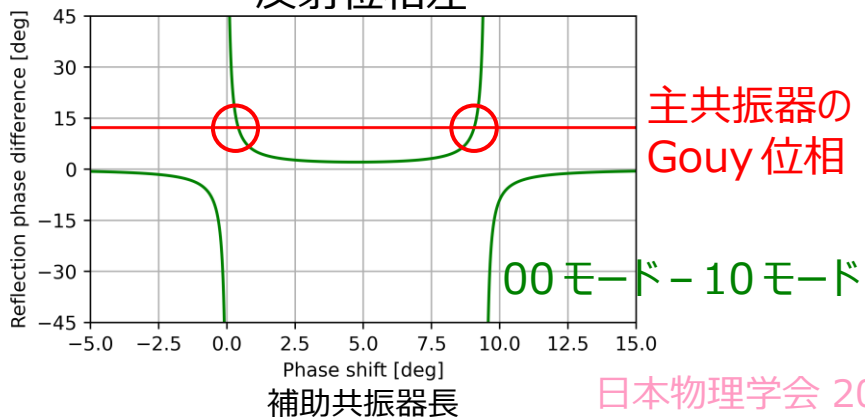


補助共振器での反射位相

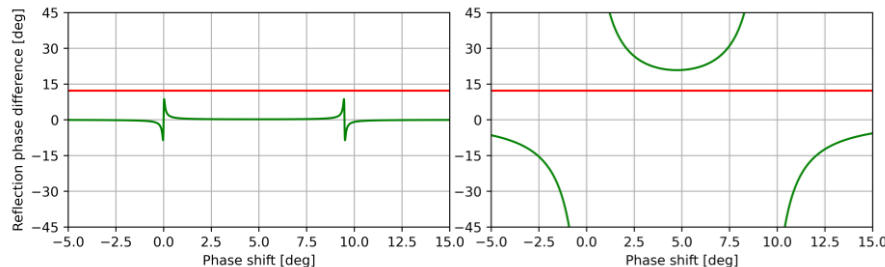


- 補助共振器で反射するときに
00モードと10モードは異なる位相を受け取る
→ 主共振器のGouy位相を打ち消せる

反射位相差

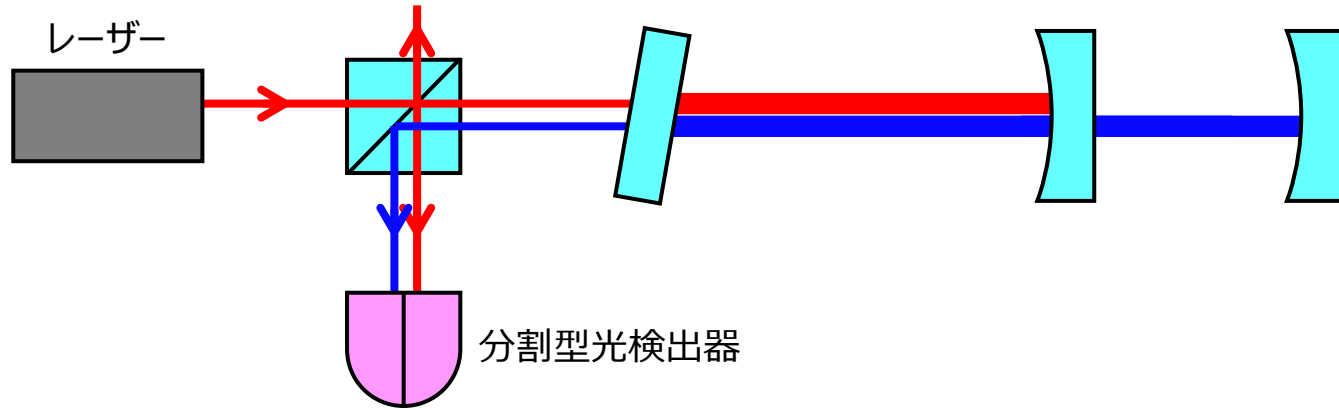


設計によっては位相補償できない

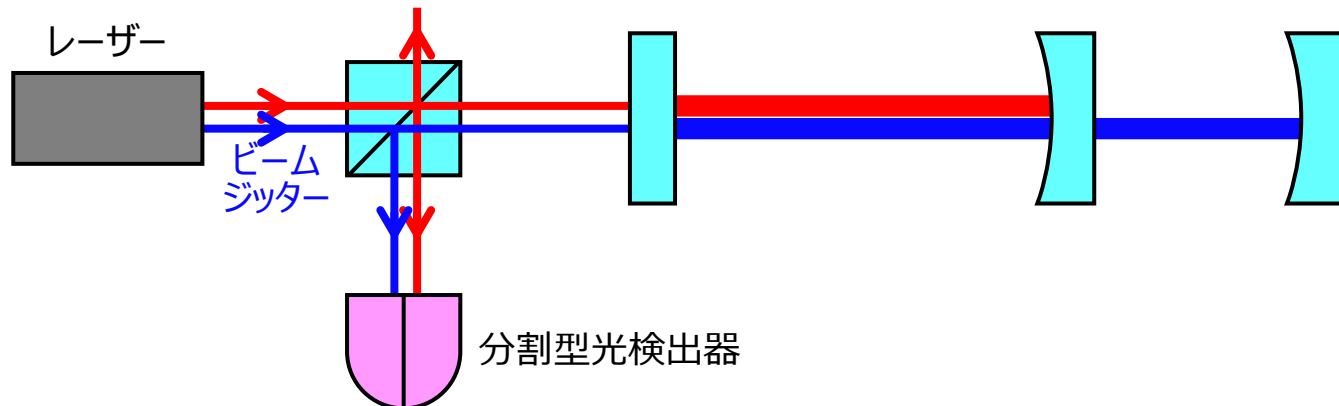


Coupled WFS のビームジッターへの応答

- 共振器のミスアラインによって内部で生まれた 10 モードは共振器内で増幅されて反射ポートへ出ていく



- ビームジッターに含まれる 10 モードも共振するが入射光と反射光に含まれる量は変わらない (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

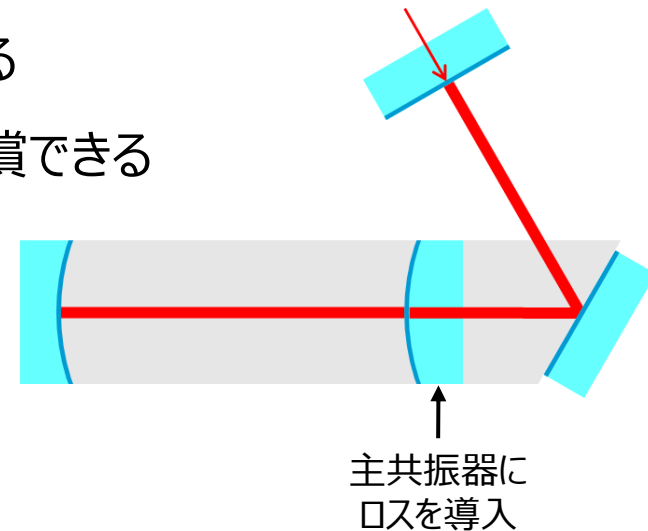


共振器の性能評価

	物理量	設計値※	測定値
主共振器	フィネス	225 - 667	200 ± 20
	Gouy 位相 [deg]	12.1 - 12.3	12.1 ± 1.0
	モードマッチ率 [%]	-	87 ± 2
補助共振器	フィネス	$(3.14 - 5.23) \times 10^3$	$(4.1 \pm 0.2) \times 10^3$
	Gouy 位相 [deg]	9.25 - 9.71	9.54 ± 0.04
	モードマッチ率 [%]	-	94 ± 2

※ Layertec 社のスペック値から計算した

- 補助共振器のフィネスが設計値と矛盾しない
→ 補助共振器内のロスが小さく位相補償できる
- Gouy 位相が設計値と矛盾しない → 位相補償できる
- 主共振器のフィネスが設計値より小さい
→ AR コーティング・基材のロスが原因
- モードマッチ率は十分大きい

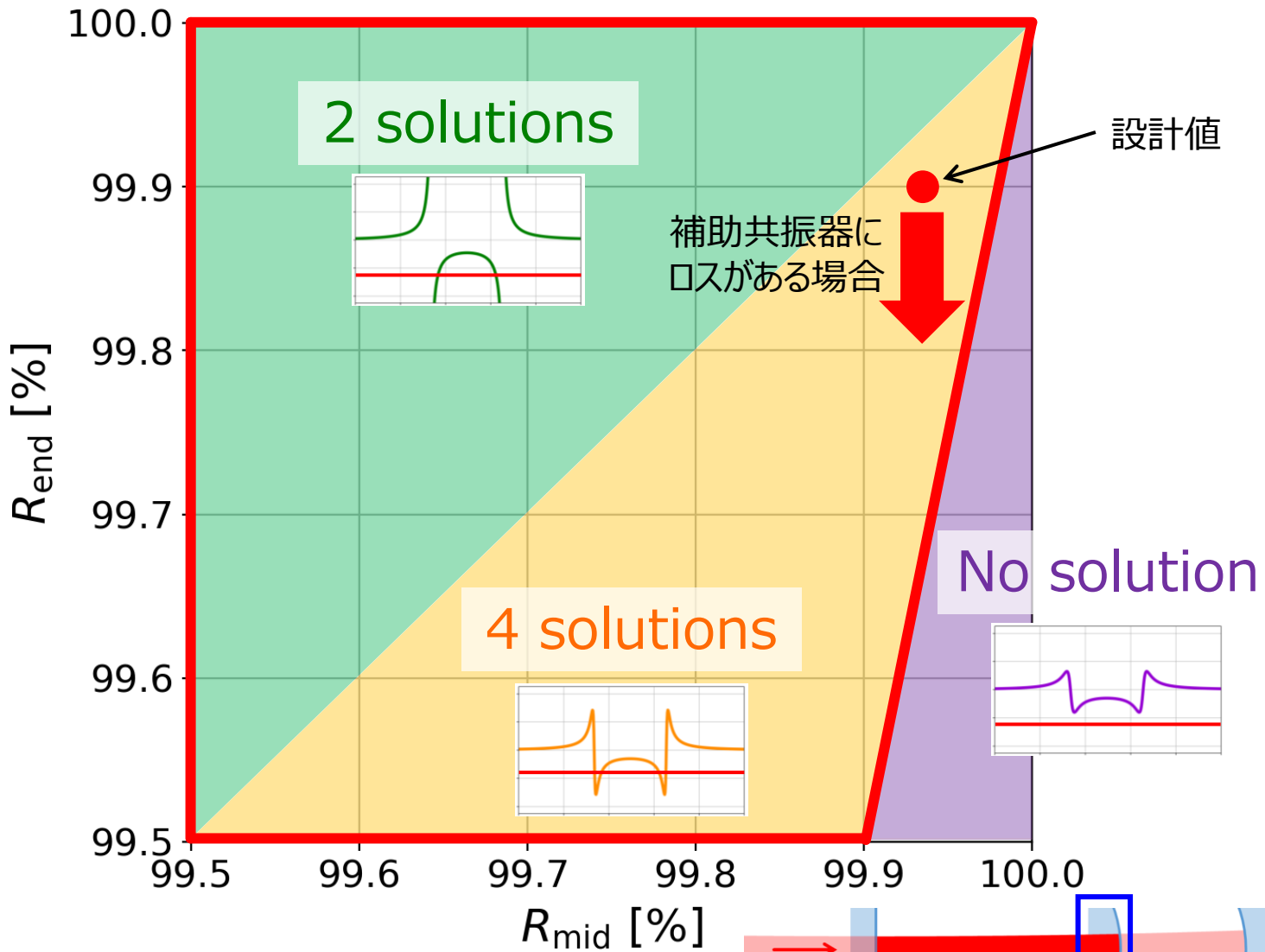
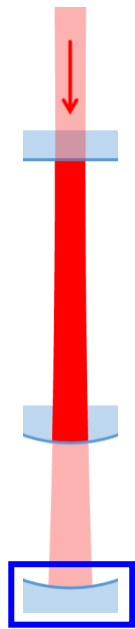


位相補償と補助共振器内ロス

ビーム半径: 500 μm

主: 8 cm

補助: 6 cm



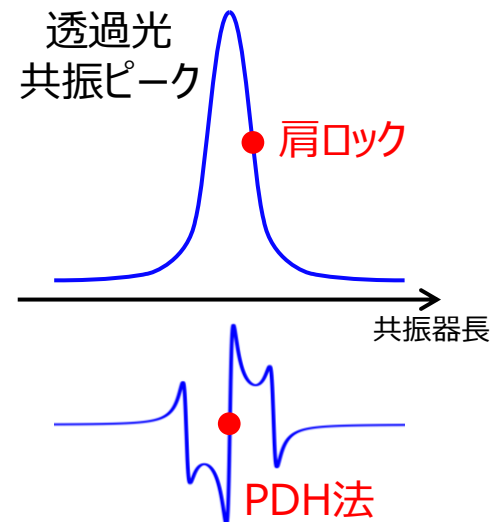
先行研究の課題

先行研究の課題

- ☹️ 制御手法が確立されていない
 - 補助共振器を肩ロックで制御した
- ☹️ 信号増幅の定量的な評価が行われていない
 - 共振器のアラインメントが数十分で変化する

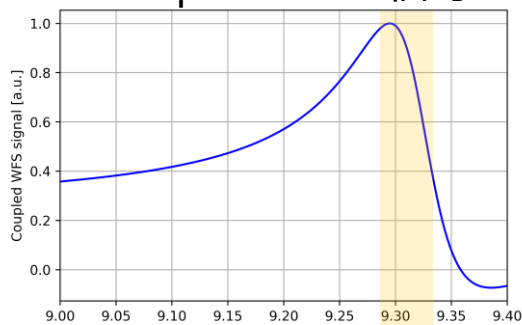


- 目的
 - 制御手法の確立
 - 信号増幅の定量的な評価
- 目標
 - 主共振器・補助共振器を共振点に制御
 - Coupled WFS 信号が WFS 信号より大きいことを実験で実証
- 方法
 - 主共振器・補助共振器ともに PDH 法で制御
 - 共振器のアラインメントが変化しにくい構成で製作

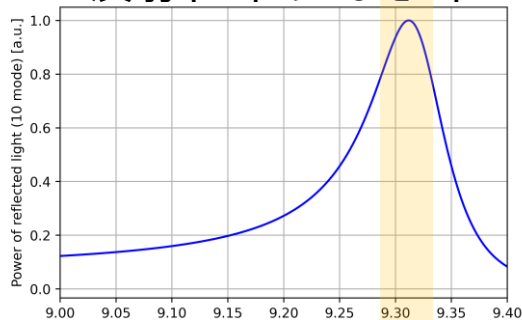


補助共振器の制御点

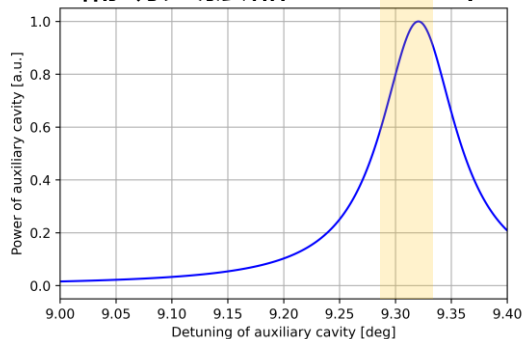
Coupled WFS 信号



反射ポートの10モード



補助共振器の10モード



- Coupled WFSの信号増幅が最大になるとき
反射ポートの10モードも最大
← 10モードが増幅されている
- Coupled WFSの信号増幅が最大になるとき
補助共振器の10モードもほぼ最大
← 共振器のフィネスが大きいため
位相補償点と共振点がほぼ一致
- 補助共振器は10モード共振点に制御してよい
← 共振点だと光量がふらつかず安定に動作できる