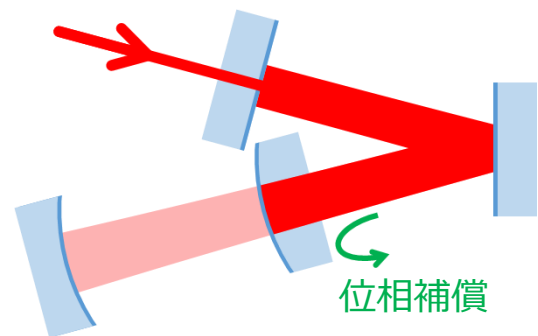
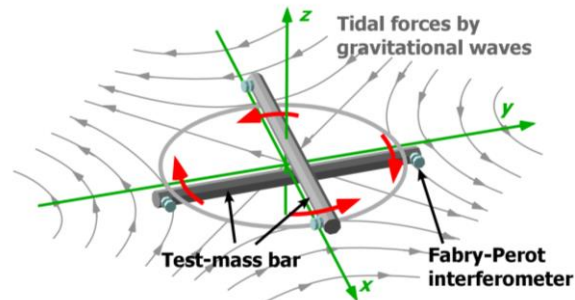


ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (28): 高感度 wavefront sensor の原理実証

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

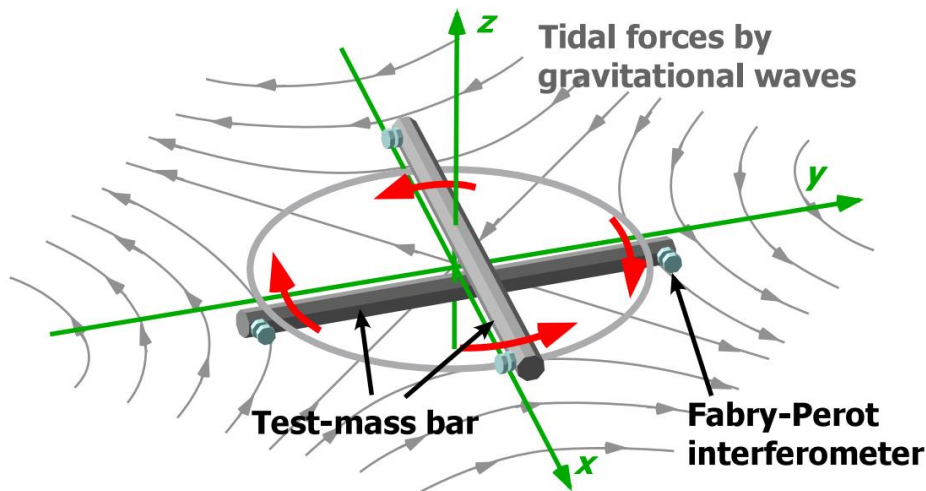
概要

- ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA で低周波重力波の検出を目指している
- プロトタイプ検出器 Phase-III TOBA を開発中
- TOBA の角度センサとして Coupled wavefront sensor を提案
- 原理実証実験を進行中
 - 制御手法の考案
 - 共振器の設計

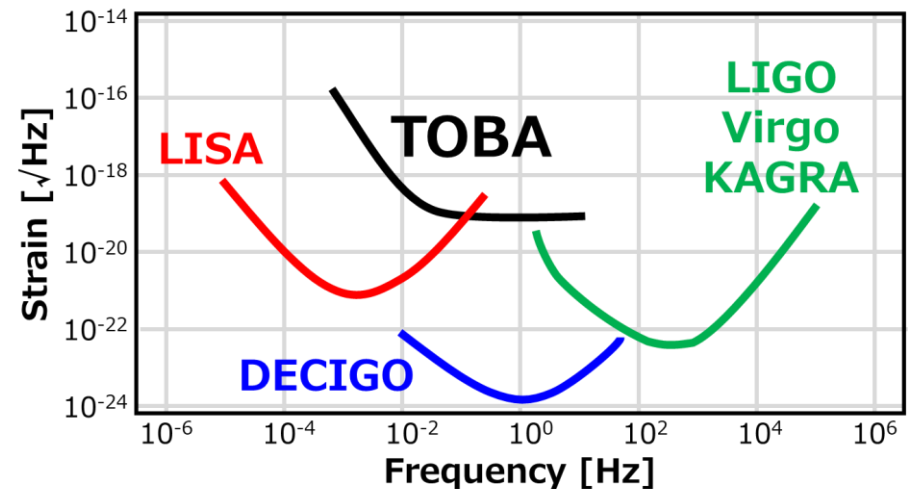


ねじれ型重力波検出器 TOBA

- 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 \sim mHz \rightarrow 低周波重力波の地上観測が可能
- 最終目標: 10 m スケールで $10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz



M. Ando+, [PRL 105, 161101 \(2010\)](#)



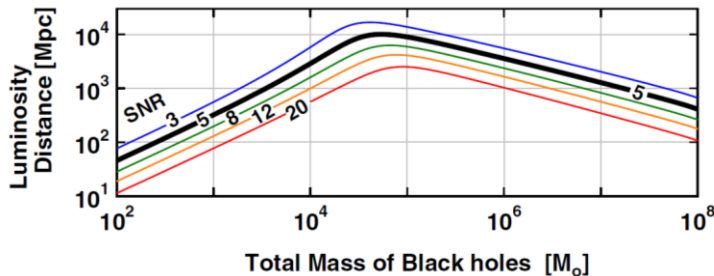
TOBA で得られるサイエンス

低周波重力波検出器として

- 中間質量ブラックホール連星合体

~10 Gpc 以内

→ 大質量ブラックホール形成過程の解明



- 背景重力波

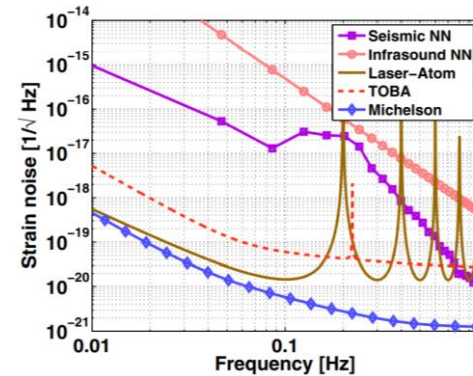
$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$

→ 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

→ 第3世代検出器の雑音低減

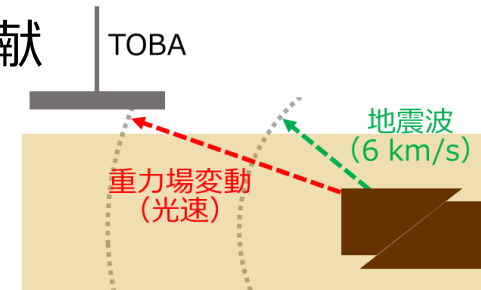


[J. Harms+ \(2013\)](#)

- 地震速報

今より10秒以上早い速報

→ 社会への貢献



TOBA 開発の流れ

Phase-I

Phase-II

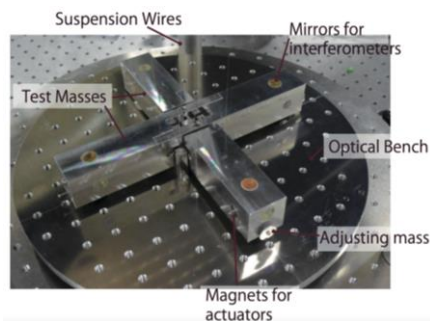
現在

Phase-III

Final

原理実証

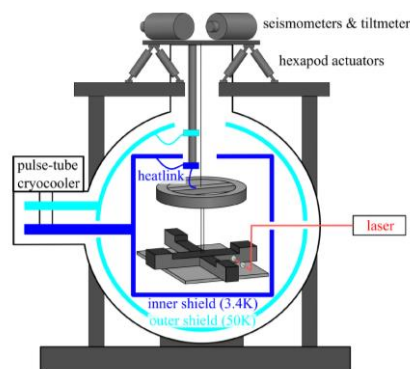
$10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ (達成)
~20 cm 試験マス
室温



K. Ishidoshiro+, [PRL 106, 161101 \(2011\)](#)
A. Shoda+, [PRD 95, 082004 \(2017\)](#)

要素開発・雑音低減

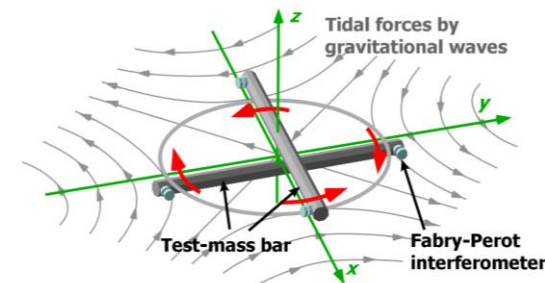
$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
35 cm 試験マス
低温 (4 K)



T. Shimoda+, [Int. J. Mod. Phys. D 29, 1940003 \(2020\)](#)

本観測

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



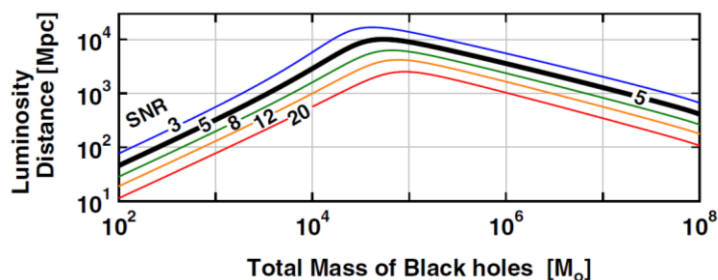
Phase-III TOBA で得られるサイエンス

低周波重力波検出器として

- 中間質量ブラックホール連星合体

~1 Mpc 以内

~10 Gpc 以内 (Final)



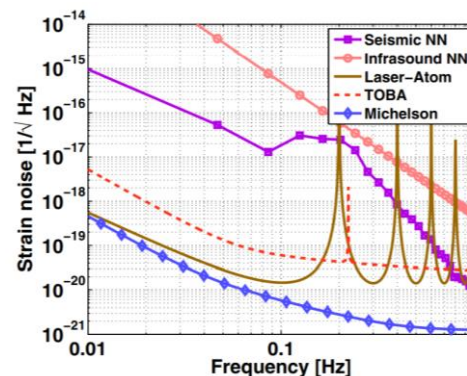
- 背景重力波

$\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$ (Final)

重力勾配計として

- 重力勾配雑音

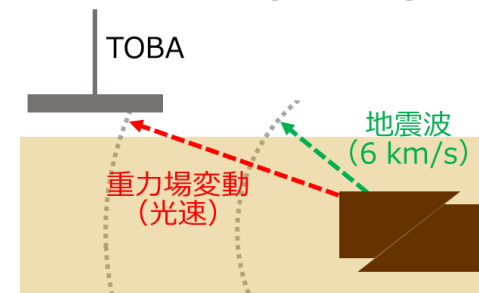
モデル検証・非定常雑音



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

- 地震速報

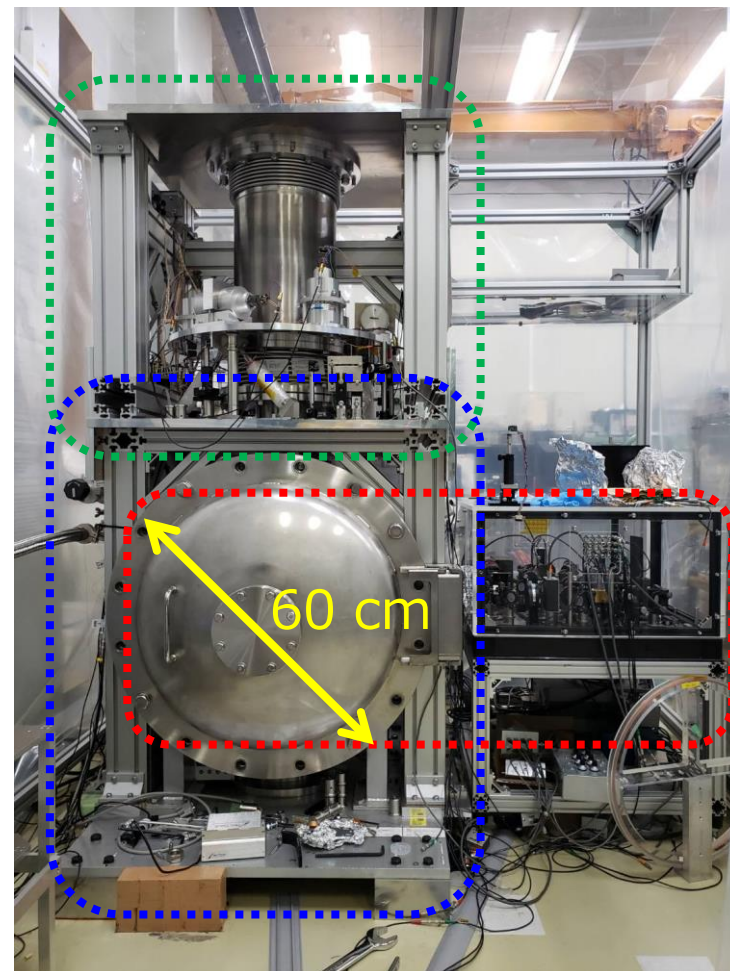
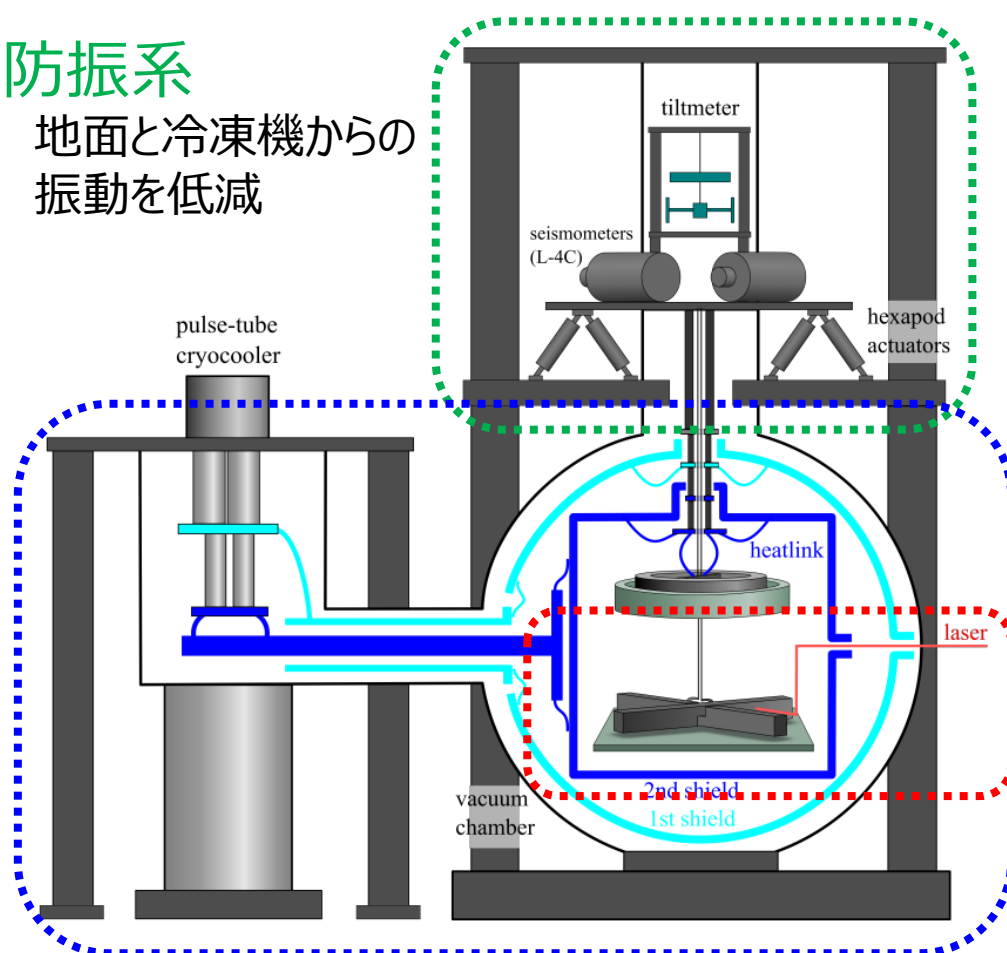
100 km 先の M7 の地震を 10 秒以内
今より 10 秒以上早い速報 (Final)



Phase-III TOBA の構成

防振系

地面と冷凍機からの振動を低減



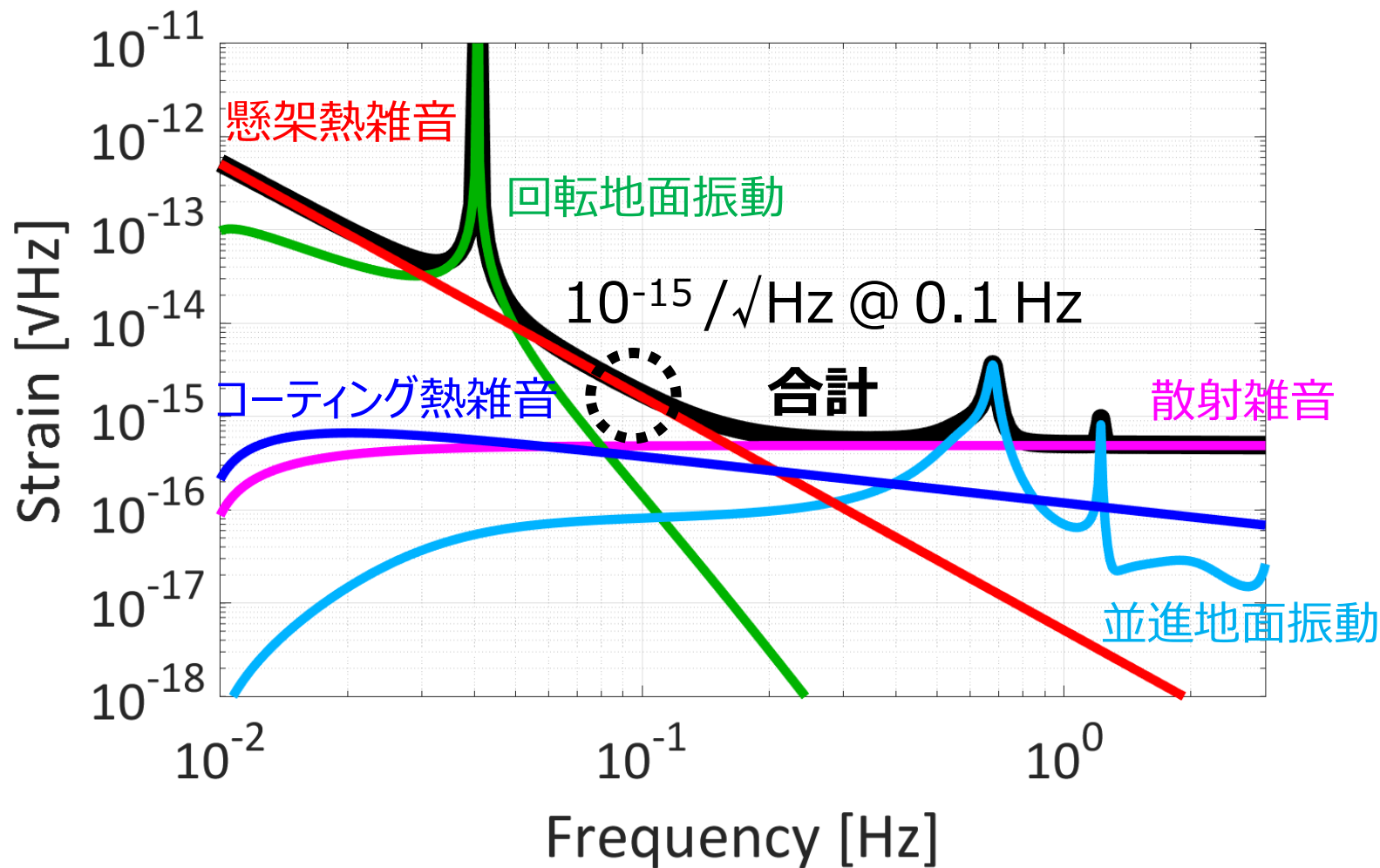
低温懸架系

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



Phase-III TOBA の開発項目

● 低温懸架系

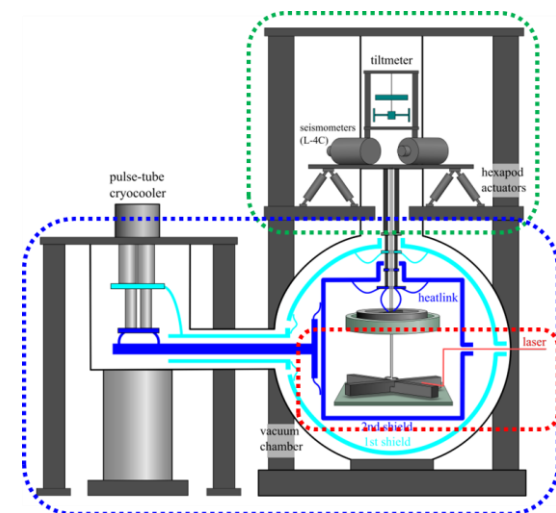
- 試験マスを4 Kまで冷却
- シリコン製35 cm試験マス
- 4 Kで高いQ値をもつ懸架ワイヤ → Ooiさんの講演

● 防振系

- 回転地面振動の低減
- 並進地面振動とのカップリングの低減
- 冷凍機からの振動の低減

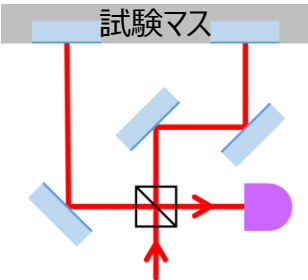
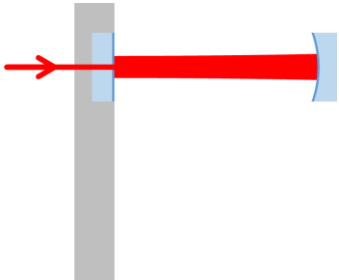
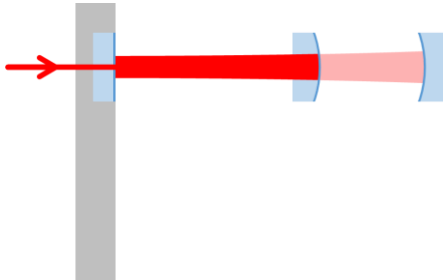















● 光学系

- モリシック光学系 (差動ファブリペロー干渉計)
→ 高野さんの講演
- Coupled wavefront sensor → 本講演



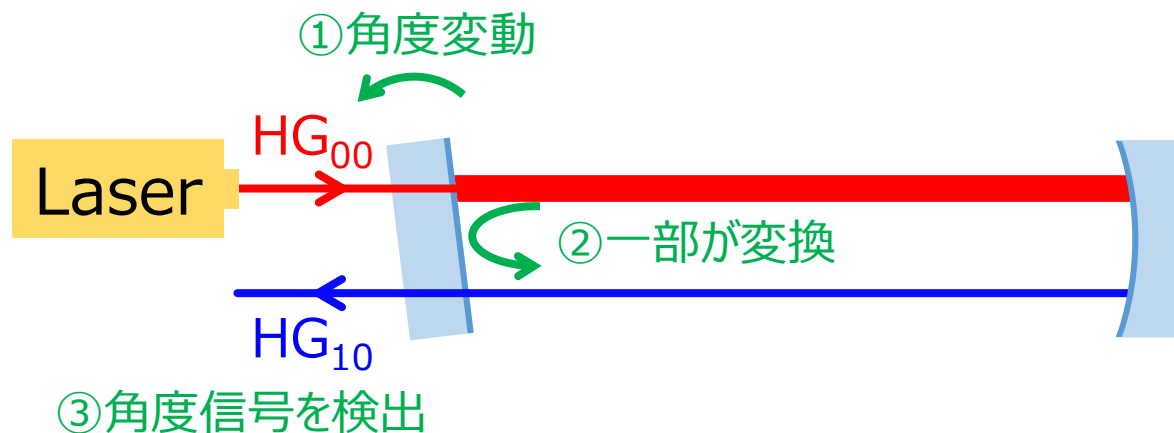
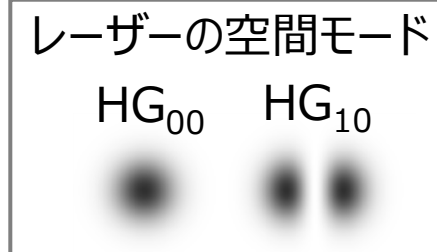
TOBA の角度センサ

- 試験マスの角度変動に大きな応答をもつセンサが必要
- 角度の読み取り雑音の要求値: 5×10^{-16} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (Phase-III)

	マイケルソン干渉計 	通常の wavefront sensor 	Coupled wavefront sensor 
感度		 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		
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			 要検証

通常の wavefront sensor の原理

- 光共振器を用いた角度センサ
- 鏡の角度変動で生じる HG_{10} を検出

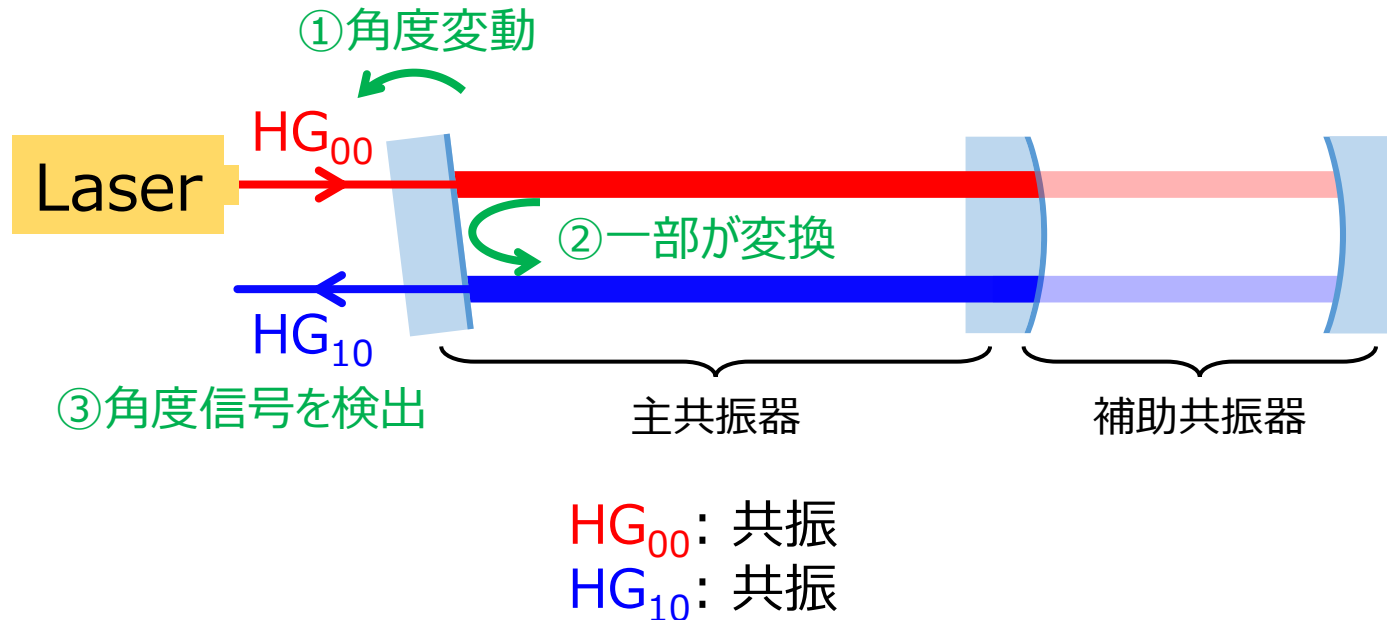


HG_{00} : 共振
 HG_{10} : 非共振

- HG_{00} と HG_{10} に位相差があり同時に共振しない
→ 共振器内で角度信号が増幅されない

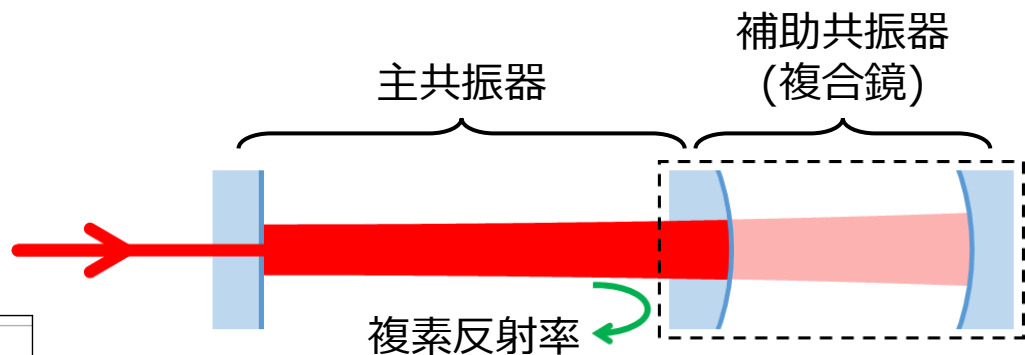
Coupled wavefront sensorの原理

- Coupled wavefront sensor:
Coupled cavity を用いた wavefront sensor



- 補助共振器で HG_{00} と HG_{10} の位相差を打ち消し
同時に共振させる
→ 共振器内で角度信号が増幅される

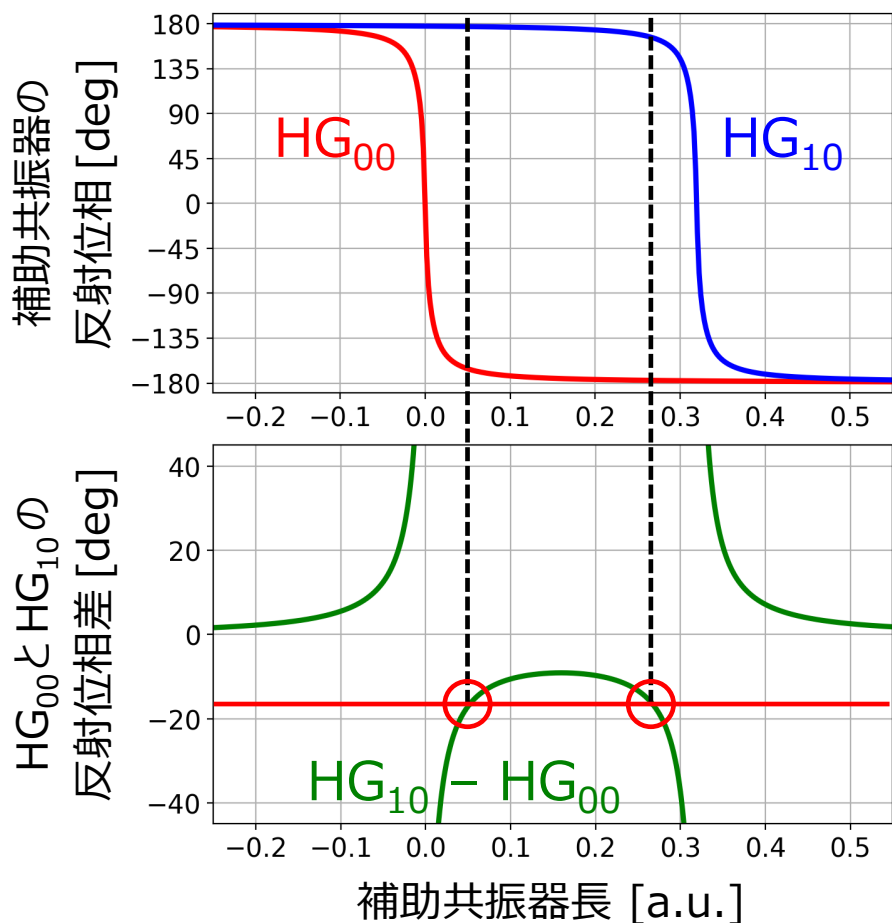
補助共振器による位相補償



補助共振器を反射するときに
 HG_{00} と HG_{10} で異なる位相を
受け取る

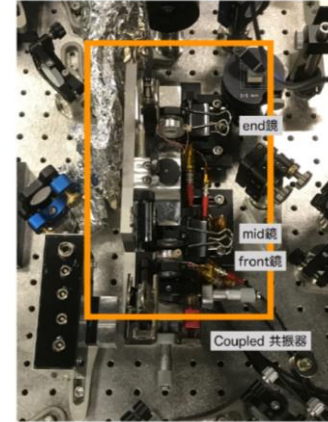
→ 主共振器の位相差を
打ち消すことができる

設計によっては位相補償できない



先行研究の問題点

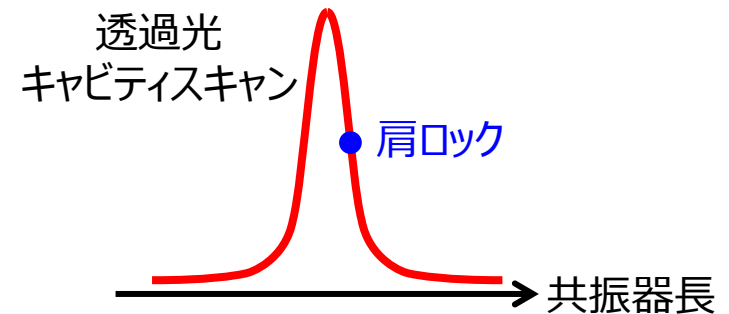
宮崎祐樹 修士論文(2019)



- ☺ 角度信号の増幅を確認した
- ☹ 補助共振器長の制御手法が確立されていない
 - 補助共振器を肩ロックで HG_{10} に制御した
(主共振器はPDH法で HG_{00} に制御)
 - HG_{10} を増やすために補助共振器をミスアラインした
 - 角度信号の増幅が理論計算よりも小さかった

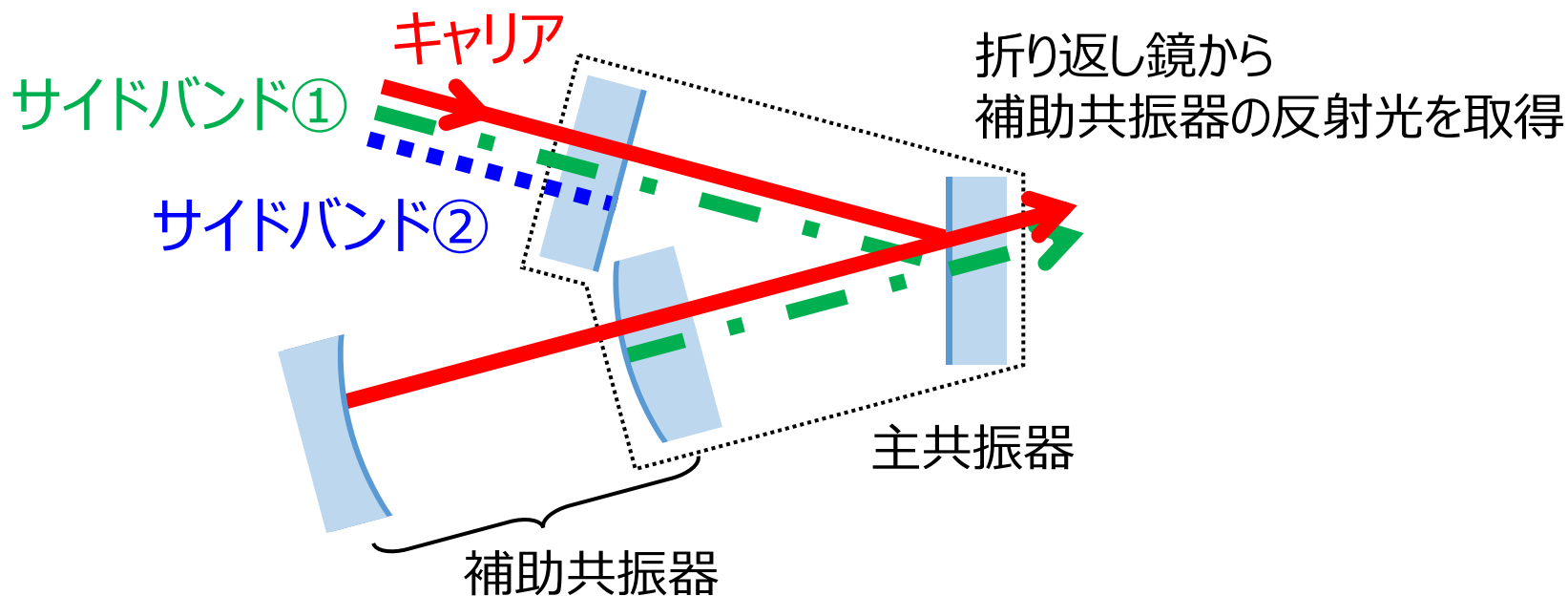
本研究の原理実証実験の目標

1. 制御手法の確立
2. 角度信号増幅の定量的な評価



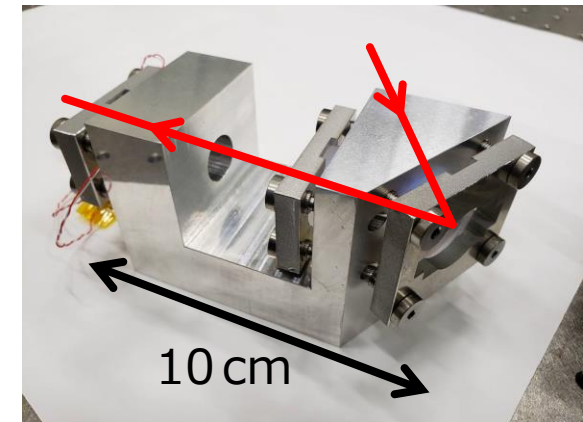
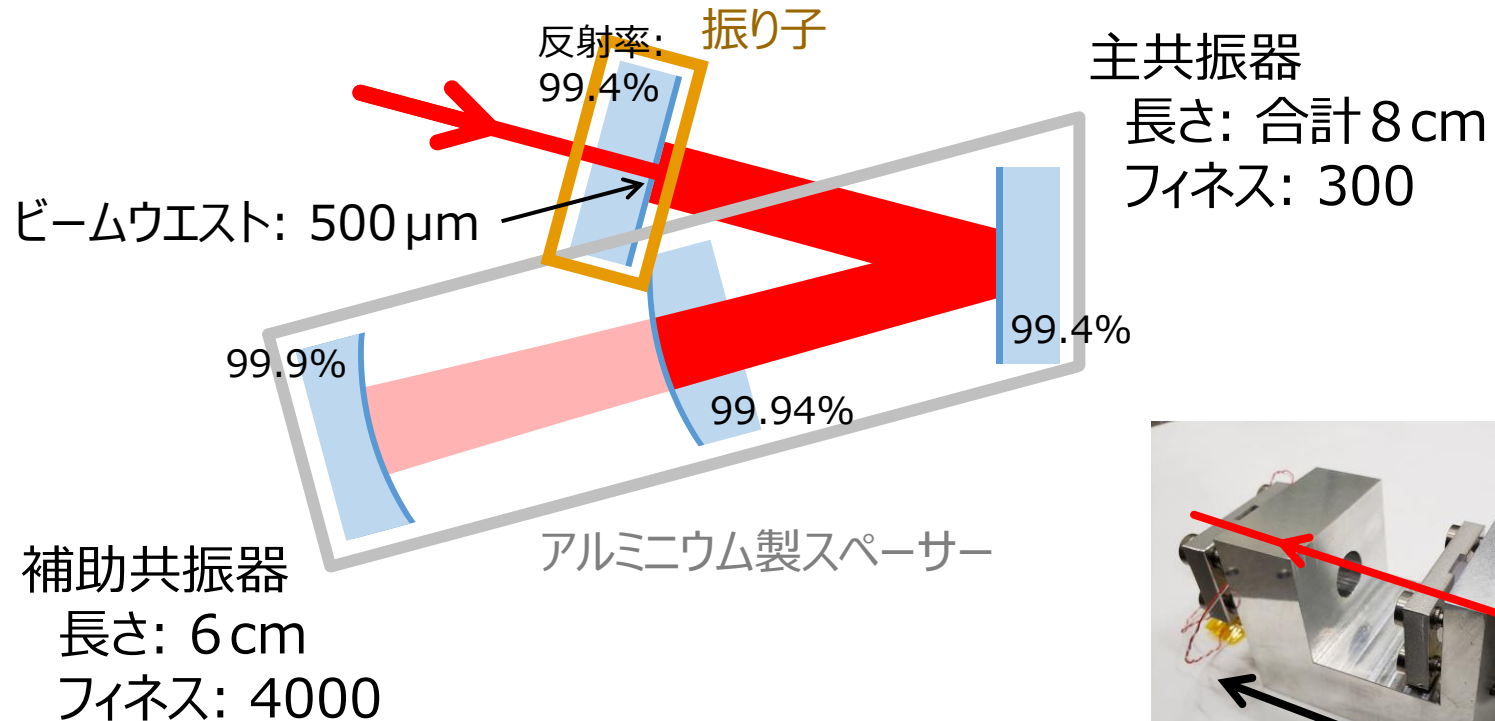
共振器長の制御手法

- 主共振器と補助共振器を PDH 法で制御
 - 2つの異なるサイドバンド周波数を使用
 - 信号取得のために主共振器を折り返す



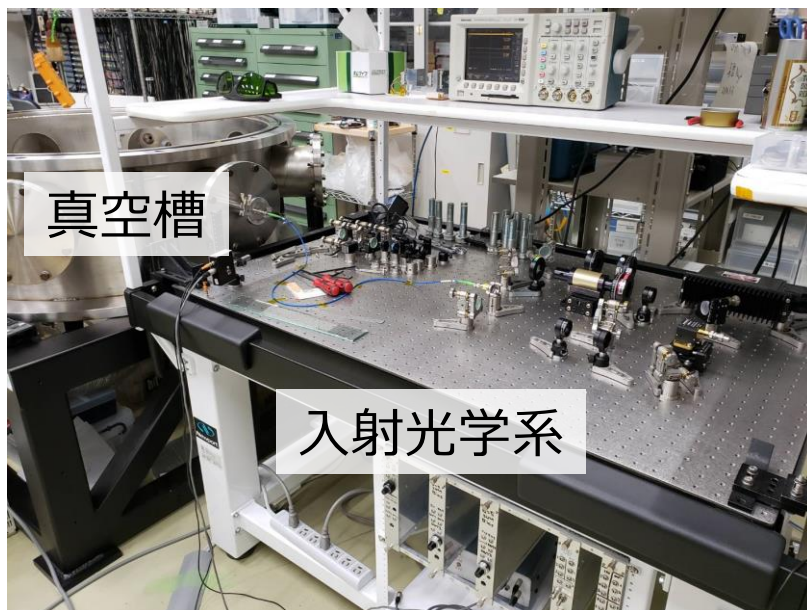
共振器の設計

- 補助共振器に 0.1% のロスがあっても位相補償できるように設計
- 入射鏡は TOBA の試験マスに見立てて振り子で吊るす
- 他の3つの鏡はアルミニウム製スペーサーに固定



実験の現状

- 入射光学系 (大気) の構築完了
 - レーザー光源と位相変調器
 - 光ファイバで真空槽へレーザーを導入
- 真空ポンプの動作確認
 - 3.4 Pa まで到達

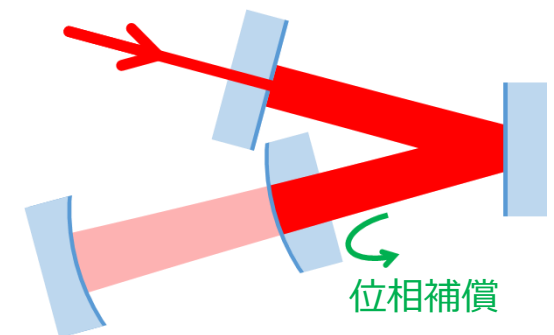
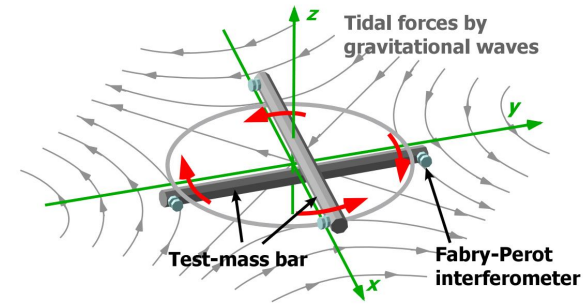


今後の実験計画

- 真空槽内に共振器の構築
 - 補助共振器 → 主共振器の順に構築
- 制御手法の実験実証
 - 2つのサイドバンド周波数・主共振器を折り返す構成
 - 主共振器と補助共振器を PDH 法で制御
- 角度信号の増幅の定量的な評価
- レーザー周波数雑音・試験マス並進のカップリングへの応答などの検証

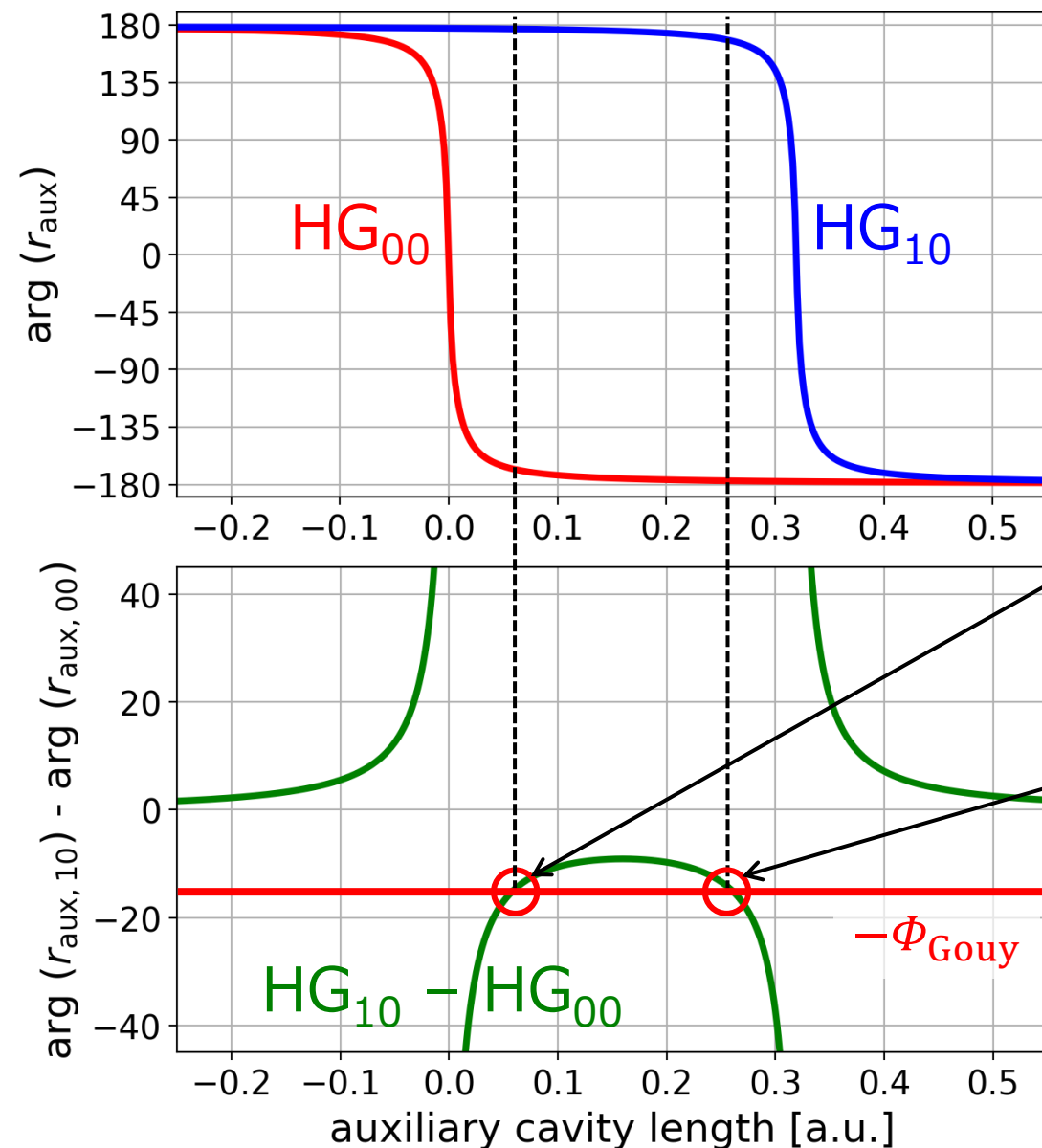
まとめ

- ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA で低周波重力波の検出を目指している
- プロトタイプ検出器 Phase-III TOBA を開発中
- TOBA の角度センサとして Coupled wavefront sensor を提案
 - 補助共振器で HG_{00} と HG_{10} の位相差を打ち消す
 - 主共振器内で角度信号が増幅される
- 原理実証実験を進行中
 - PDH 法で制御できる構成を考案
 - 共振器の設計・入射光学系の構築を完了



予備スライド

補助共振器の動作点

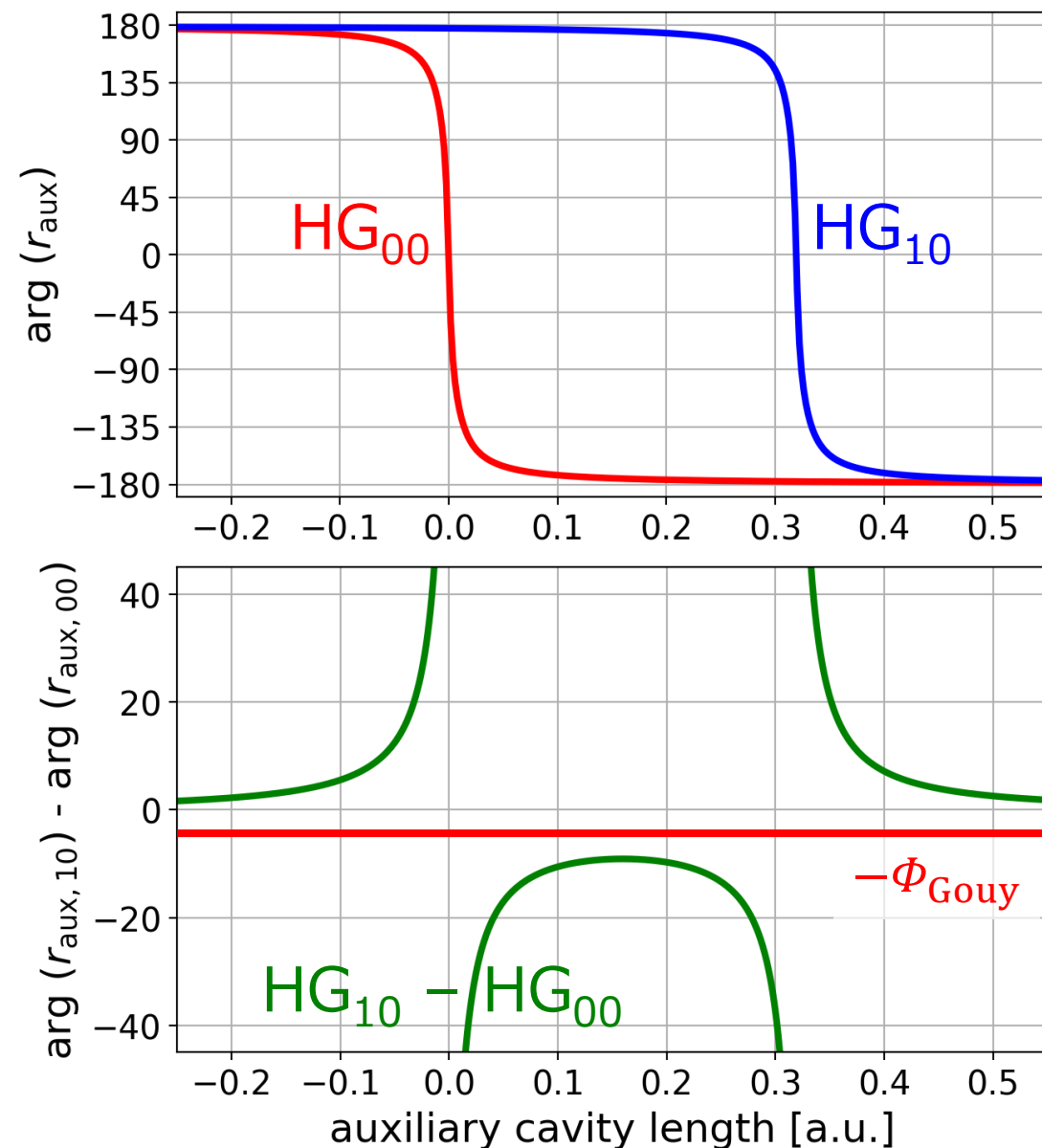


- 補助共振器を共振点からずらす
- 複数の動作点が存在しうる

HG_{00} の位相を変える
 HG_{10} が非共振

HG_{00} が非共振
 HG_{10} の位相を変える

補助共振器の動作点



位相補償のための要求:

十分に Φ_{Gouy} が大きい

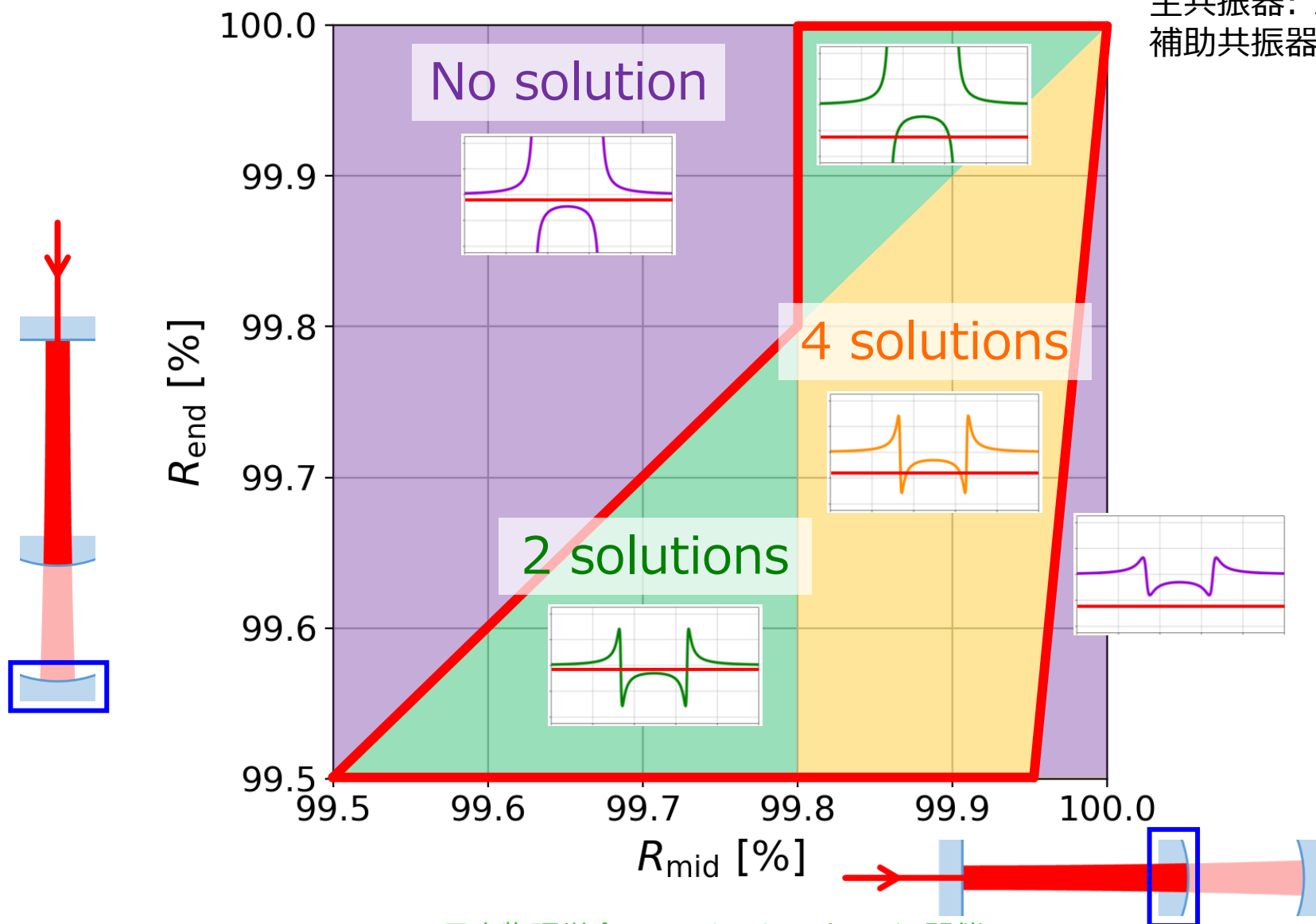
- 長い共振器長
↔ 真空槽の大きさ
- 小さいビーム径
(= 小さい鏡の曲率半径)
↔ 熱雑音

これらを適切に設計する

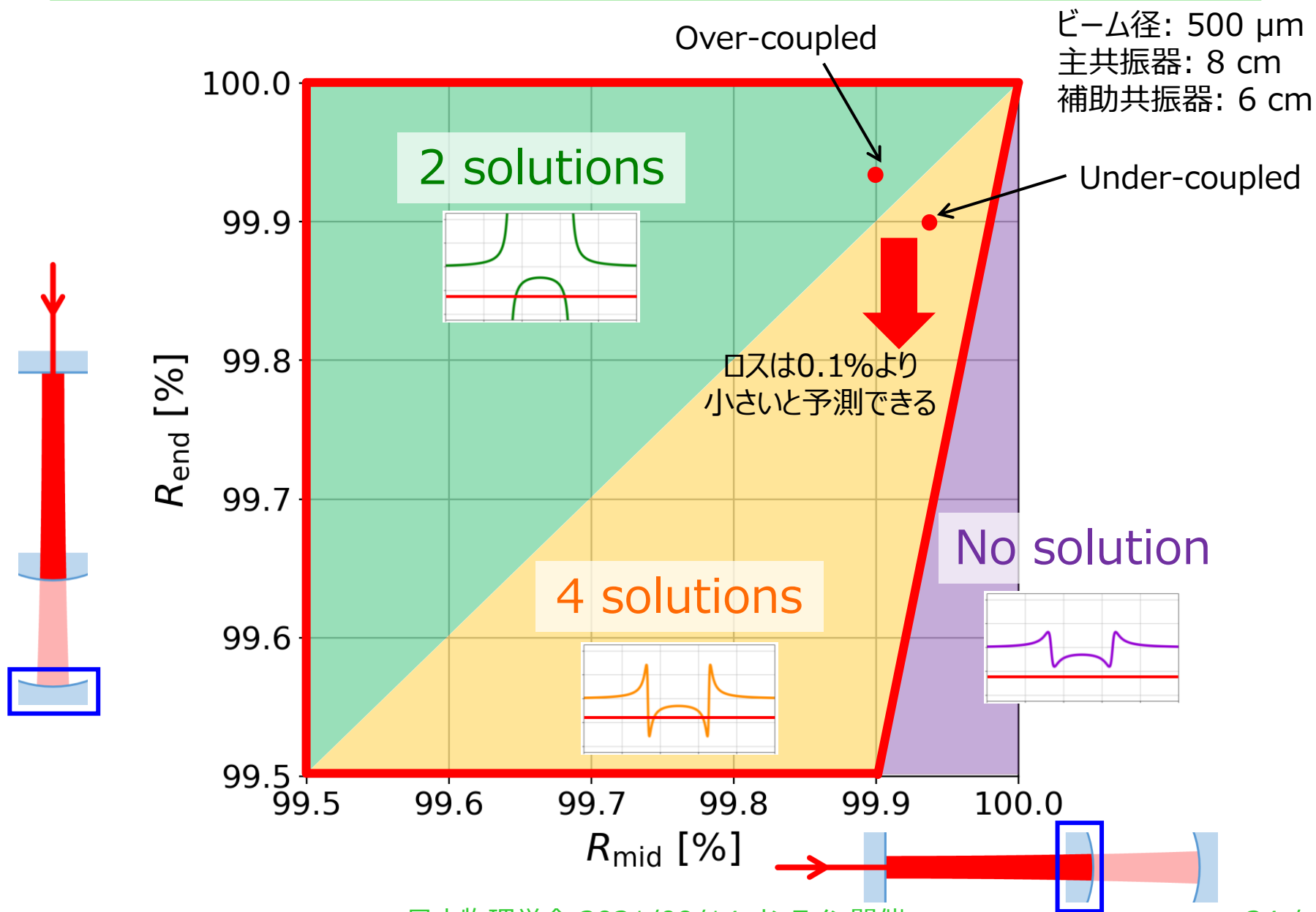
- 共振器長
- 鏡の曲率半径
- 鏡の反射率

位相補償可能な鏡の反射率

ビーム径: 800 μm
主共振器: 10 cm
補助共振器: 7.5 cm

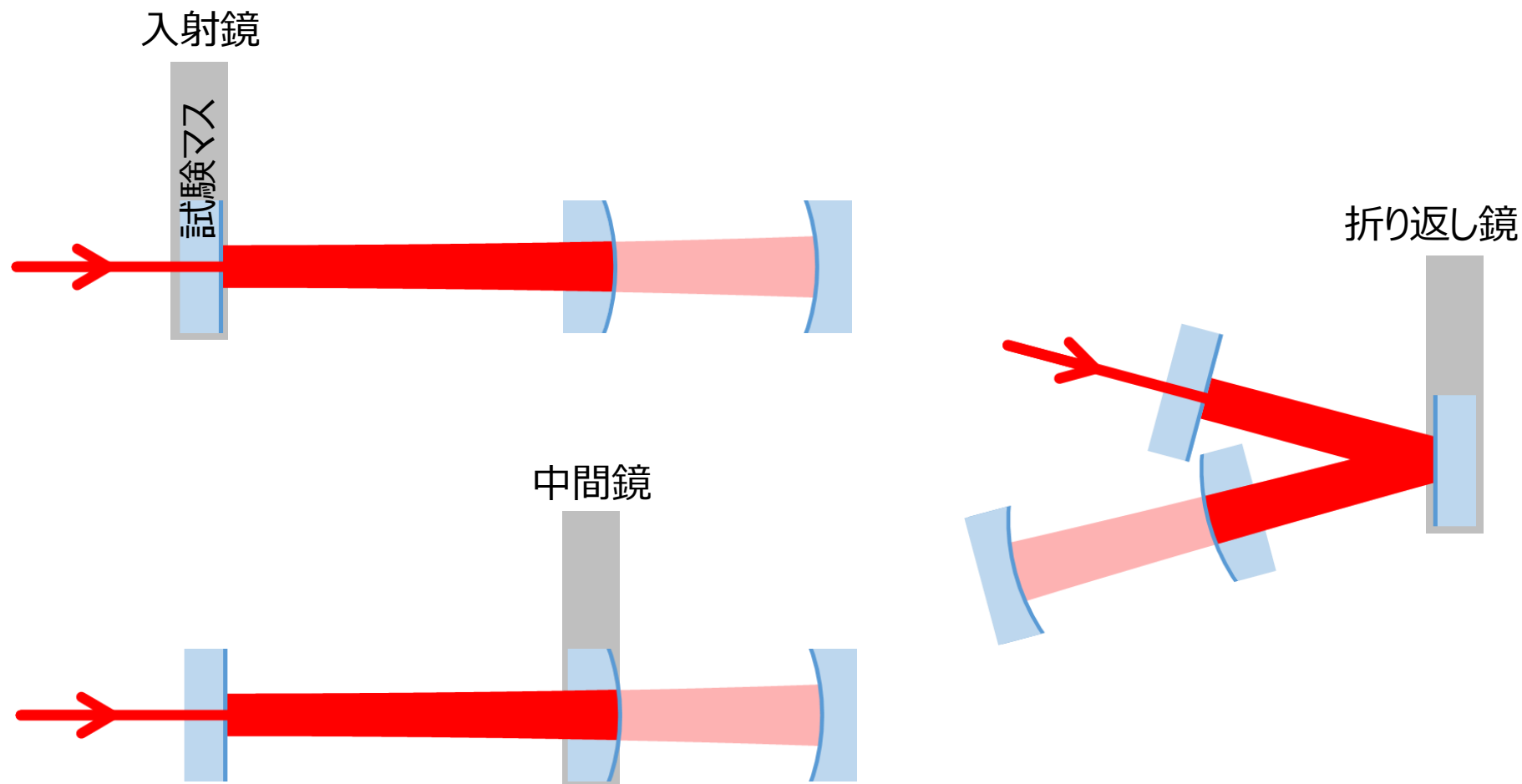


補助共振器のロスに対する強さ

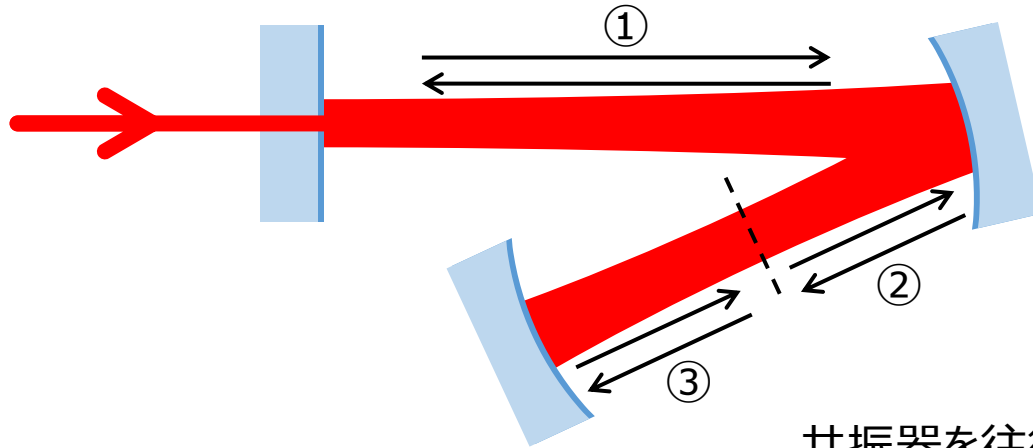


TOBAと角度センサの構成案

- 試験マスはどこにでも置くことができる



Folded wavefront sensor



共振器を往復するときの Gouy 位相
 $(①+②+③) \times 2 = 2\pi$

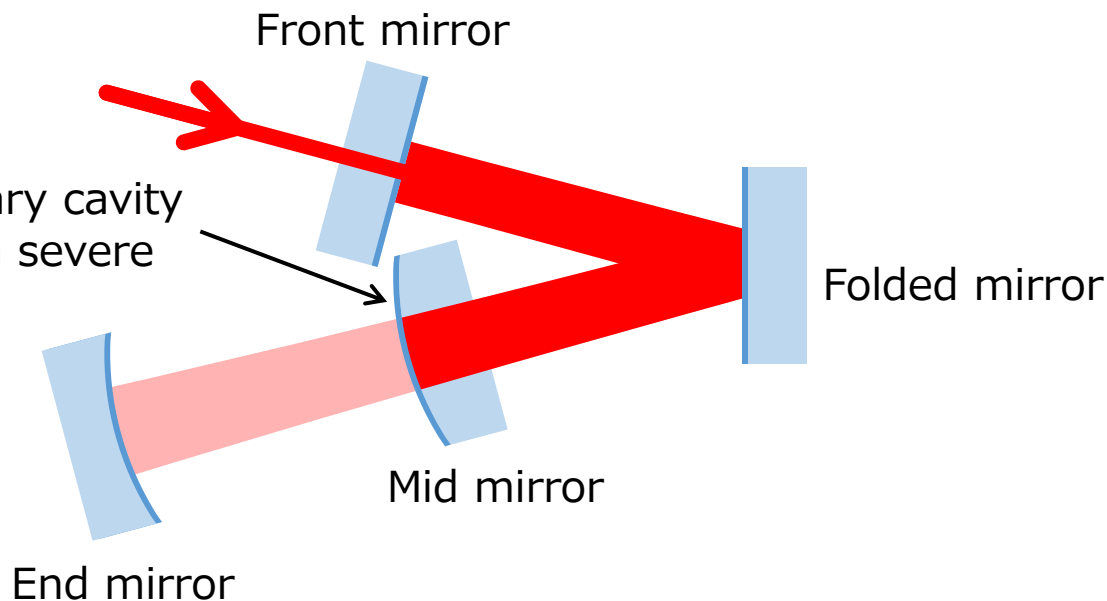
- 共振器長を適切に選ぶと HG_{00} と HG_{10} が同時共振する
→ HG_{10} が共振器内で増幅される

角度センサの比較

	マイケルソン 干渉計	光てこ	通常の WFS	Folded WFS	Coupled WFS
感度 (Phase-III TOBA の要求値: 5×10^{-16} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	○	×	×	○	○
ビームジッター	△	×	×	○	○
周波数	×	○	○	○	○
並進カップリング	×	○	○	○	○
その他の デメリット				冷凍機内での 系の収縮に 弱い	2自由度の 制御が必要

鏡の設計値

HR coating is facing auxiliary cavity since auxiliary cavity has a severe loss requirement



Large RoC is better for thermal noise
Small RoC is better for alignment

	Front & Folded	Mid	End
Radius of curvature	∞ (flat)	7 m convex	4 m concave
Reflectivity (1)	99.4 %	99.94 %	99.9 %
Reflectivity (2)		99.9 %	99.94 %

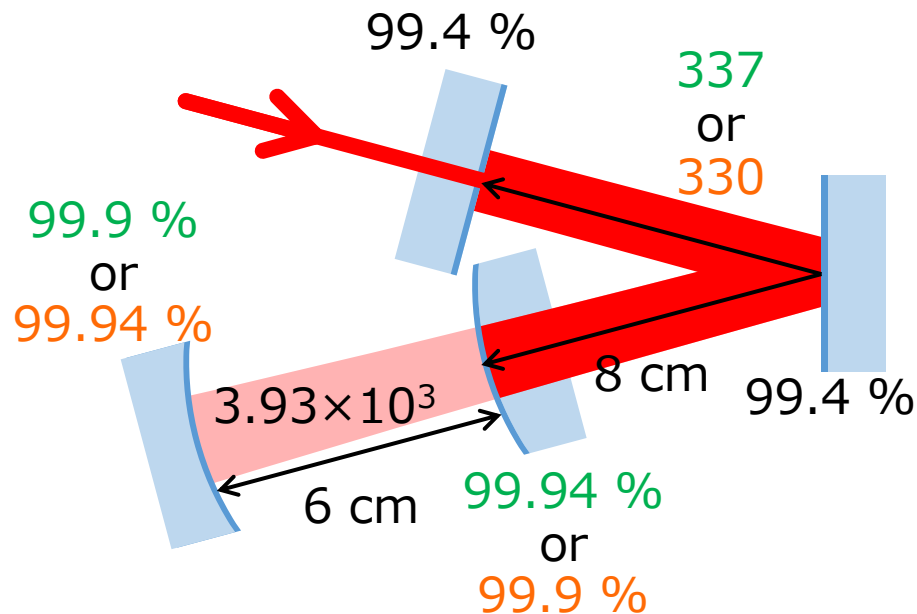
Auxiliary cavity is

under-coupled
(better to control)

over-coupled
(better to compensate phase)

共振器の設計値

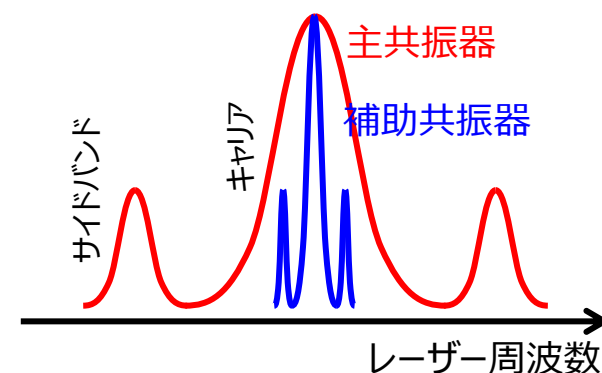
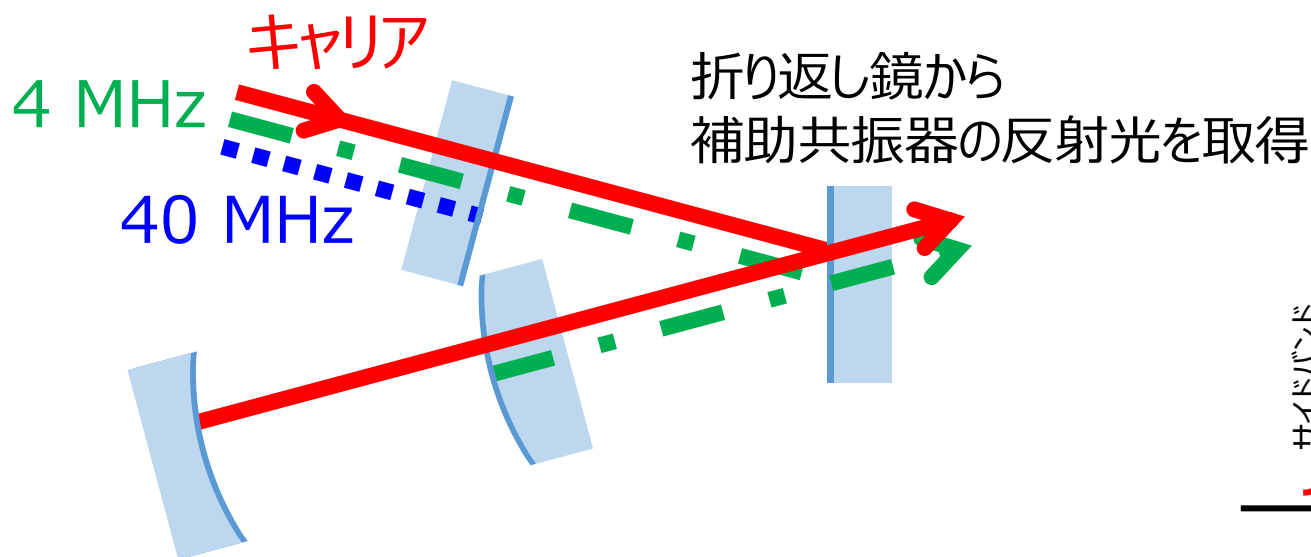
- Cavity length
 - 8 cm (total of main)
 - 6 cm (auxiliary)
- Beam radius
 - 500 μm at front mirror (waist)
 - 508 μm at end mirror
- Finesse
 - 337 (main when auxiliary is under-coupled)
 - 330 (main when auxiliary is over-coupled)
 - 3.93×10^3 (auxiliary)



共振器長の制御案 (1)

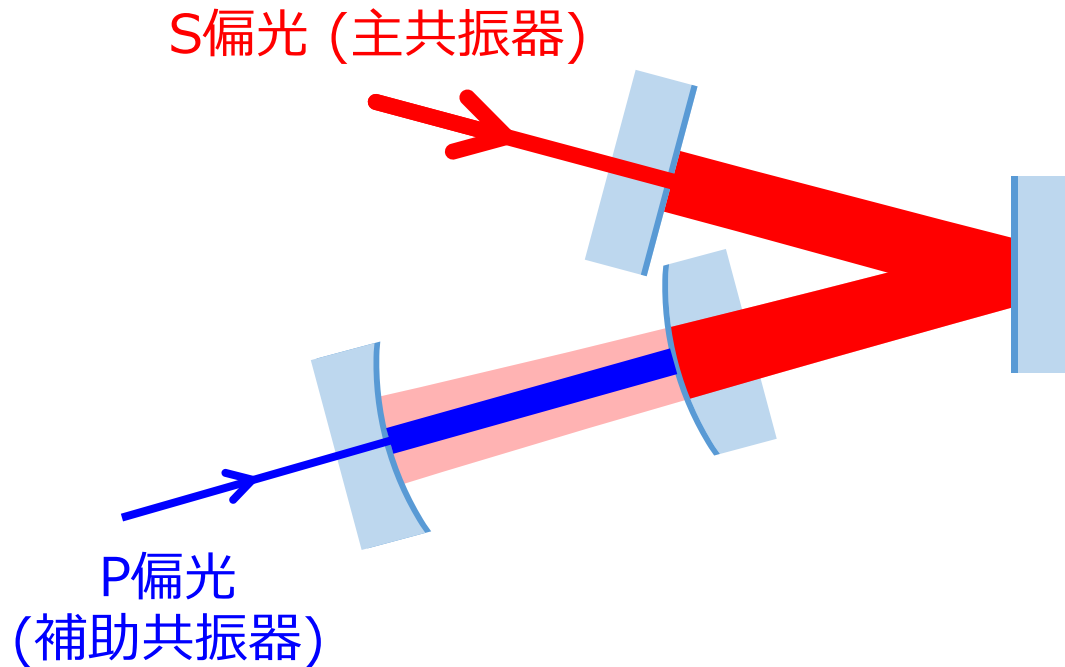
- 主共振器と補助共振器を PDH 法で制御
 - 2つの異なるサイドバンド周波数を使用
 - 信号取得のために主共振器を折り返す

	長さ	FSR	フィネス	FWHM	変調周波数
主共振器	8 cm	3.8 GHz	300	13 MHz	40 MHz
補助共振器	6 cm	5 GHz	4000	1.3 MHz	4 MHz



共振器長の制御案 (2)

- 主共振器と補助共振器を PDH 法で制御
 - 補助共振器の後ろから異なる偏光を入射する
 - 主共振器と補助共振器の反射光を独立に取得することができる



共振器の設計

- 共振器長

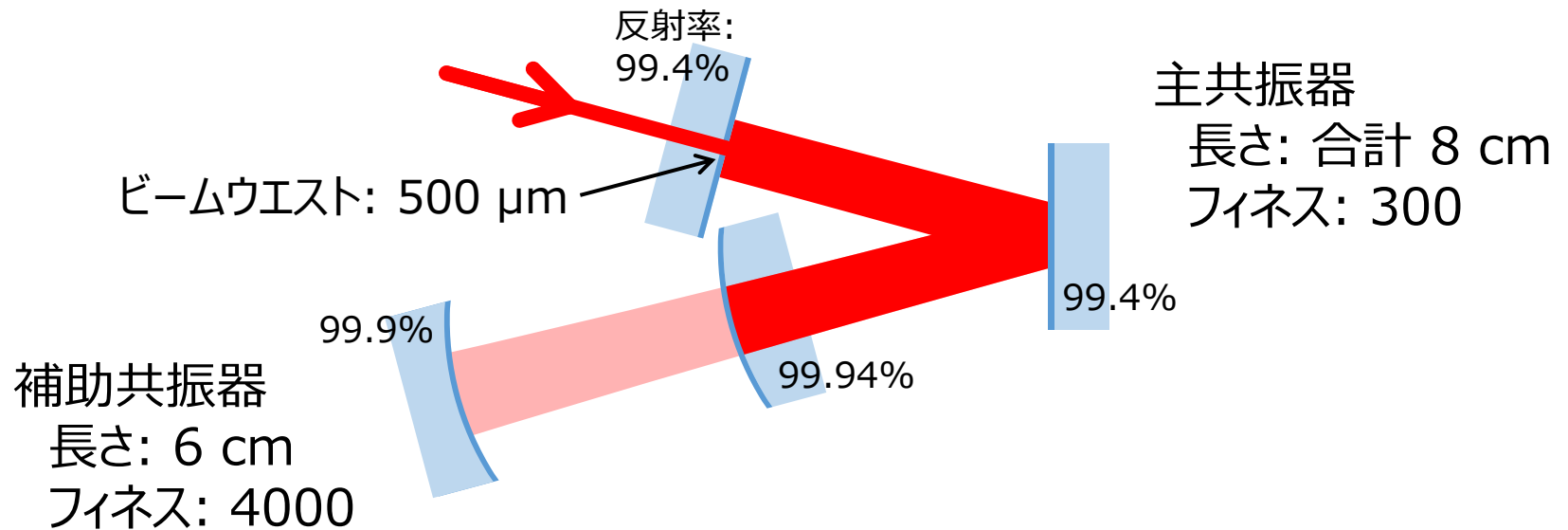
- 長くするほど 😊 位相補償を行やすい ↔ 😞 実験系が大きくなる

- レーザーのビーム径

- 小さいほど 😊 位相補償を行やすい ↔ 😞 角度信号が小さくなる

- 鏡の反射率

- 補助共振器に0.1%のロスがあっても位相補償できるように設計



スパーサー・鏡・ピエゾ素子の構成

