



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

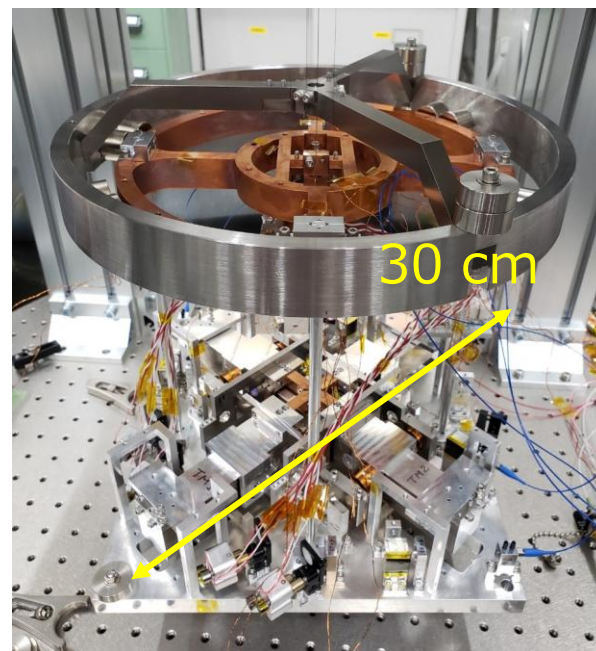
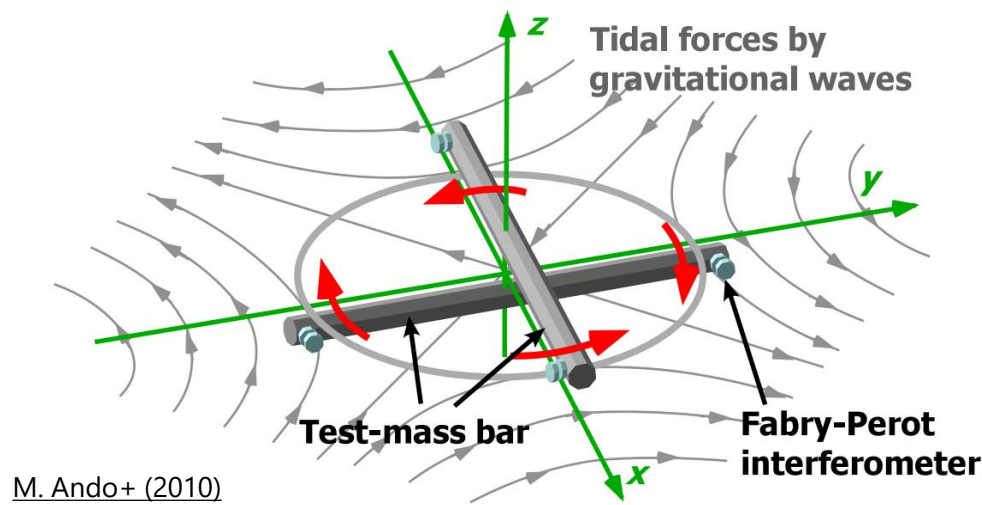
JSR Fellowship

低周波重力勾配観測のための 高感度ねじれ振り子の開発

大島 由佳 (安東研究室 博士3年)

概要

- 低周波重力波・地震の観測を目指し
ねじれ振り子型重力勾配計TOBAを提案した
- 小型のPhase-III TOBAを開発中
- Phase-III TOBAの光学系と懸架系の設計・開発を行った



目次

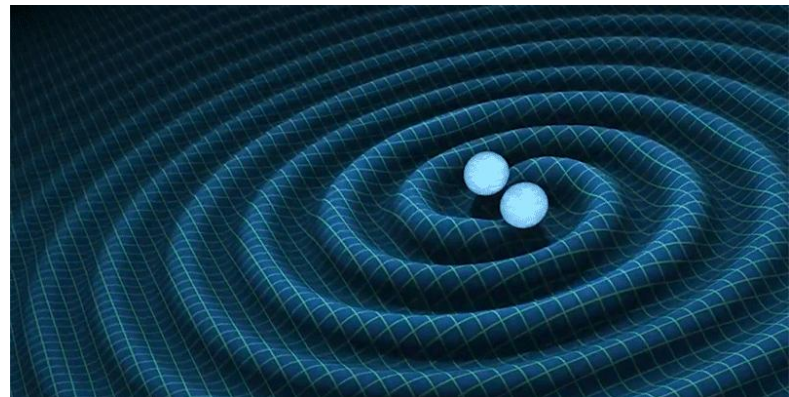
- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
 - TOBAの原理・サイエンス
 - 開発ロードマップ
 - Phase-III TOBAの構成・目標感度
- Phase-III TOBAの光学系・懸架系の開発
 - 設計感度
 - 実験セットアップ
 - 結果・考察

目次

- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
 - TOBAの原理・サイエンス
 - 開発ロードマップ
 - Phase-III TOBAの構成・目標感度
- Phase-III TOBAの光学系・懸架系の開発
 - 設計感度
 - 実験セットアップ
 - 結果・考察

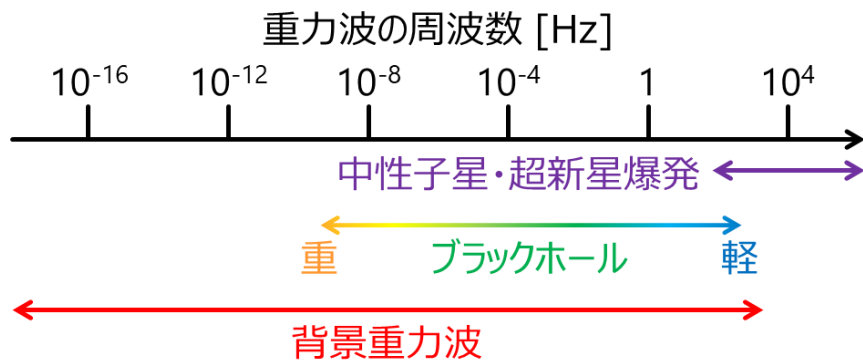
低周波数の重力波観測

- 重力波: 時空の歪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



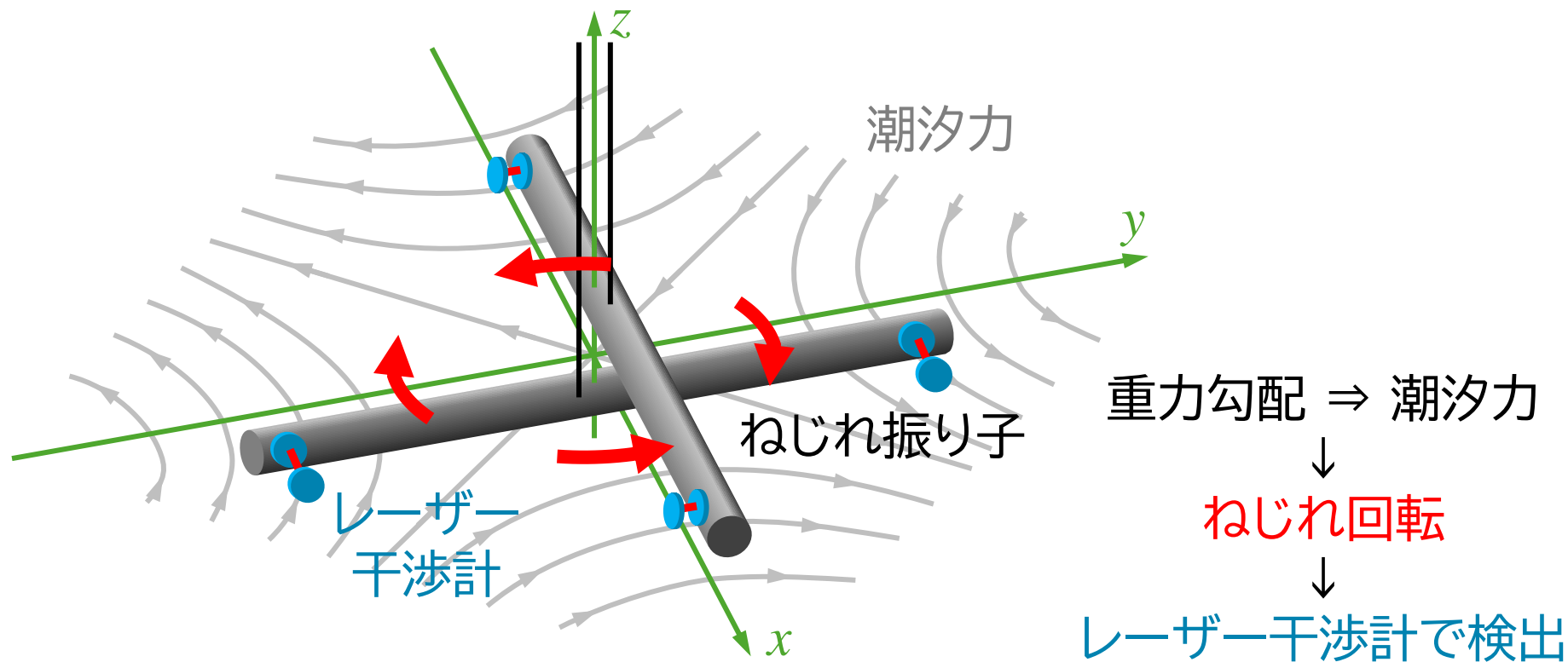
- 重力波観測の現状
 - 重力波望遠鏡LIGO・Virgo・KAGRAが稼働中
 - 10 Hz-1 kHzの感度が良い
 - 恒星質量ブラックホールや中性子星の連星合体を約90イベント検出 (2023年時点)

- 低周波数帯を観測することが重要
 - 重いブラックホール連星合体
 - 背景重力波



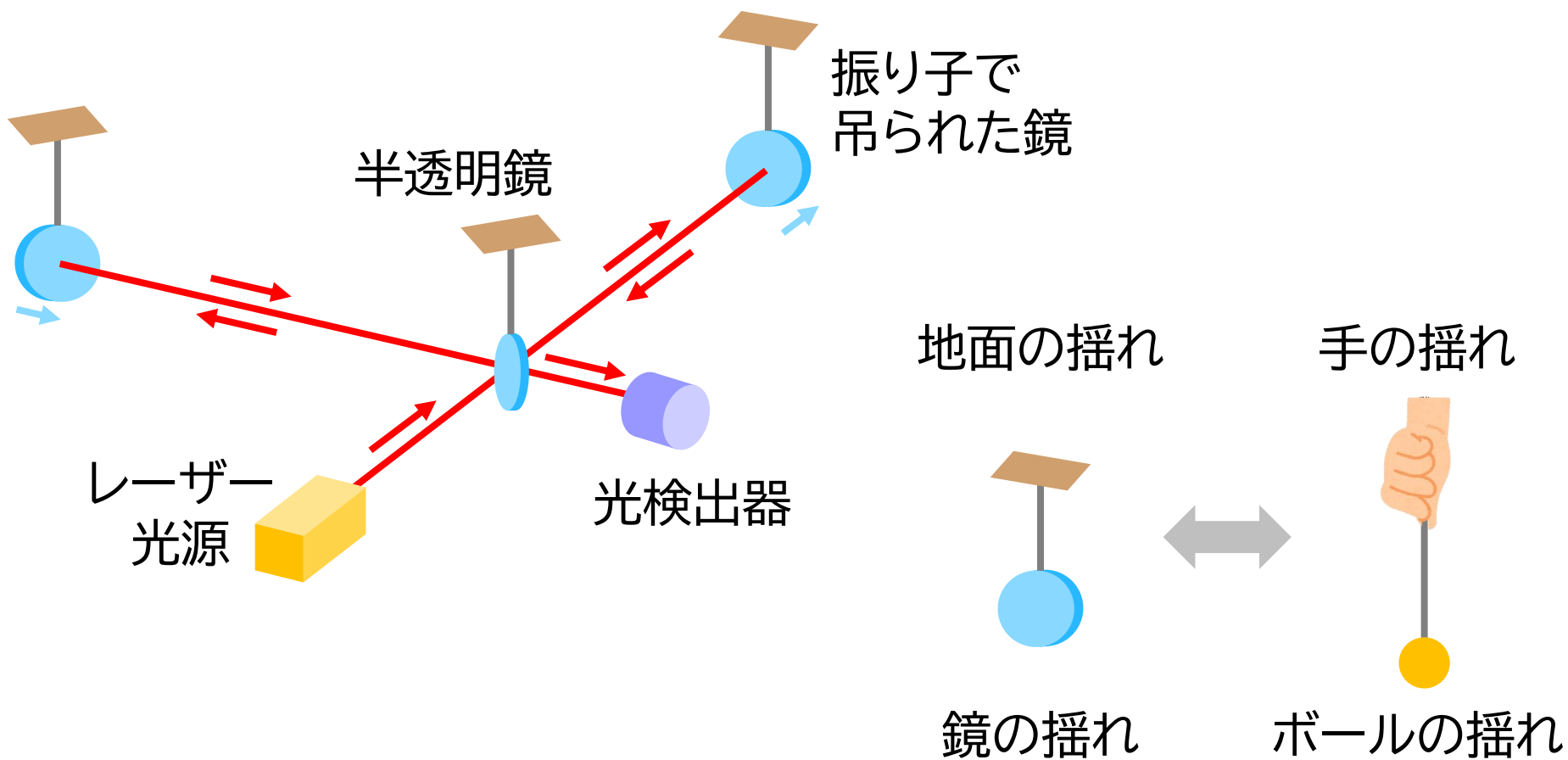
ねじれ振り子型重力勾配計TOBA

- TOBA: Torsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスでねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い (~ 1 mHz)
→ 地上で0.1 Hz-10 Hzの重力勾配変動が観測可能



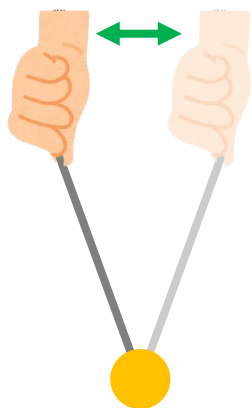
振り子による防振

- 重力波望遠鏡LIGO・Virgo・KAGRAでは鏡を振り子で吊ることで高周波数(~ 100 Hz)での地面の揺れを防振している

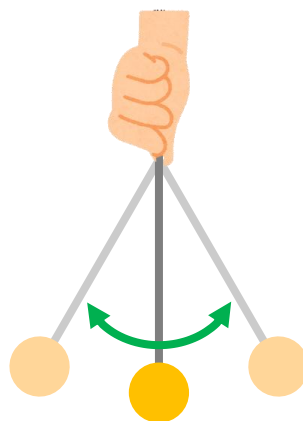


振り子の共振周波数と防振

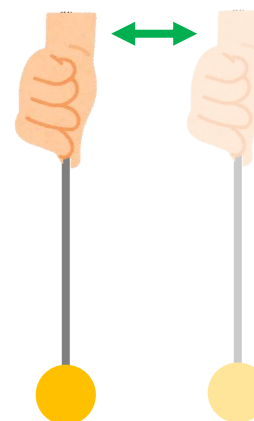
地面の揺れが速い
(高い周波数)



振り子の
共振周波数



地面の揺れがゆっくり
(低い周波数)



○ 鏡はほぼ揺れない
→ 防振できる

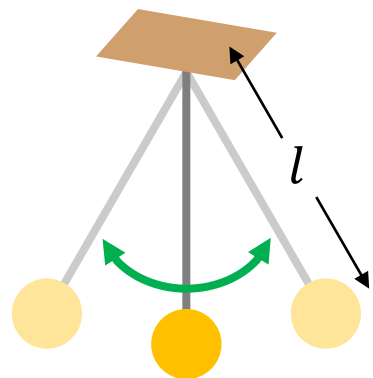


✗ 鏡は大きく揺れる
→ 防振できない

低周波数の防振には振り子の共振周波数を低くすることが必要

ねじれ振り子の優位性

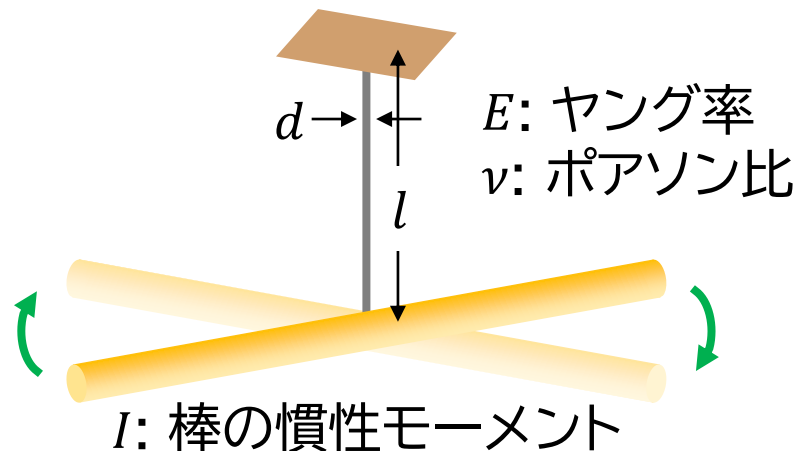
● 普通の振り子



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

- $l = 25 \text{ cm}$ のとき $f_0 = 1 \text{ Hz}$
- $f_0 = 30 \text{ mHz}$ にするには $l = 300 \text{ m}$

● ねじれ振り子

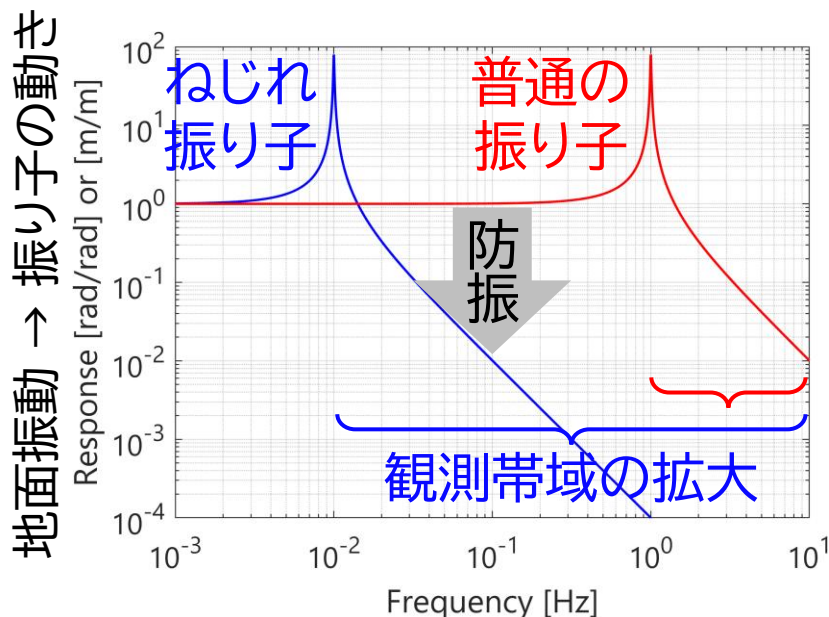


$$f_{\text{Yaw}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi E d^4}{64 l (1 + \nu) I}}$$

- $l = 25 \text{ cm}$, $d = 0.3 \text{ mm}$,
 $E = 411 \text{ GPa}$, $\nu = 0.28$ (タングステン),
 $I = 0.016 \text{ kg m}^2$

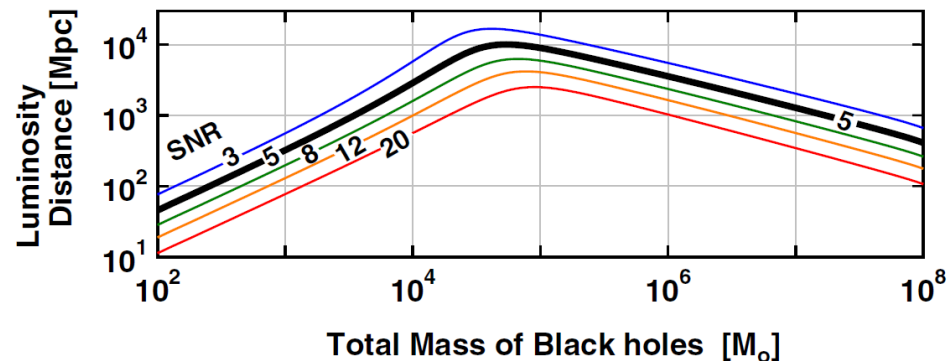
(アルミ, $30 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$)

$$\rightarrow f_{\text{Yaw}} = 30 \text{ mHz}$$



TOBAのサイエンス: 低周波重力波

- 中間質量ブラックホール連星合体
 - ~ 1 Mpc 以内 (近傍銀河) (Phase-III TOBA)
 - ~ 10 Gpc 以内 (宇宙全体) (Final TOBA)
 - 超巨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
 - $\Omega_{\text{GW}} < 10$ (Phase-III TOBA)
 - $\Omega_{\text{GW}} < 10^{-7}$ (Final TOBA)
 - 初期宇宙の直接探査

TOBAのサイエンス: 地震

- 地震の断層破壊で生じる重力場変動を用いた地震検出
 - 地震波を用いる従来の手法と独立な地震検出手法
 - 地震波を用いる従来の手法より素早い検出・速報
 - マグニチュード推定精度の向上
- 事後解析で重力場変動が確認された
 - より高い精度・リアルタイムの地震検出を目指す

重力勾配計

地表

重力場変動
(光速)

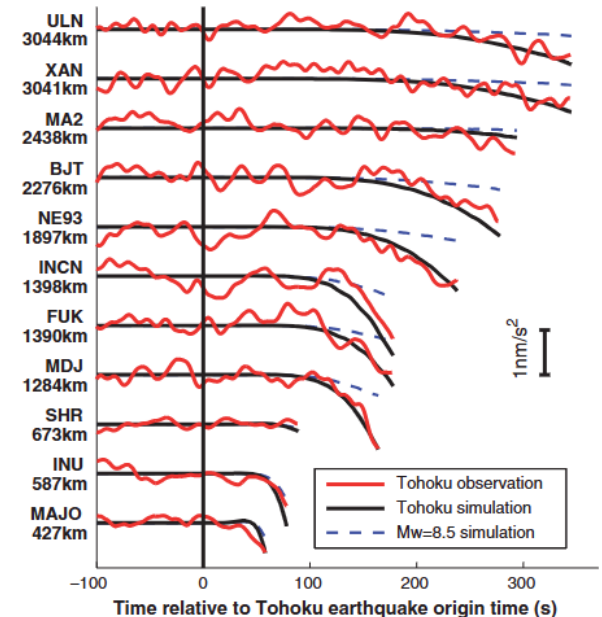
地震波
(6-8 km/s)

膨張

圧縮

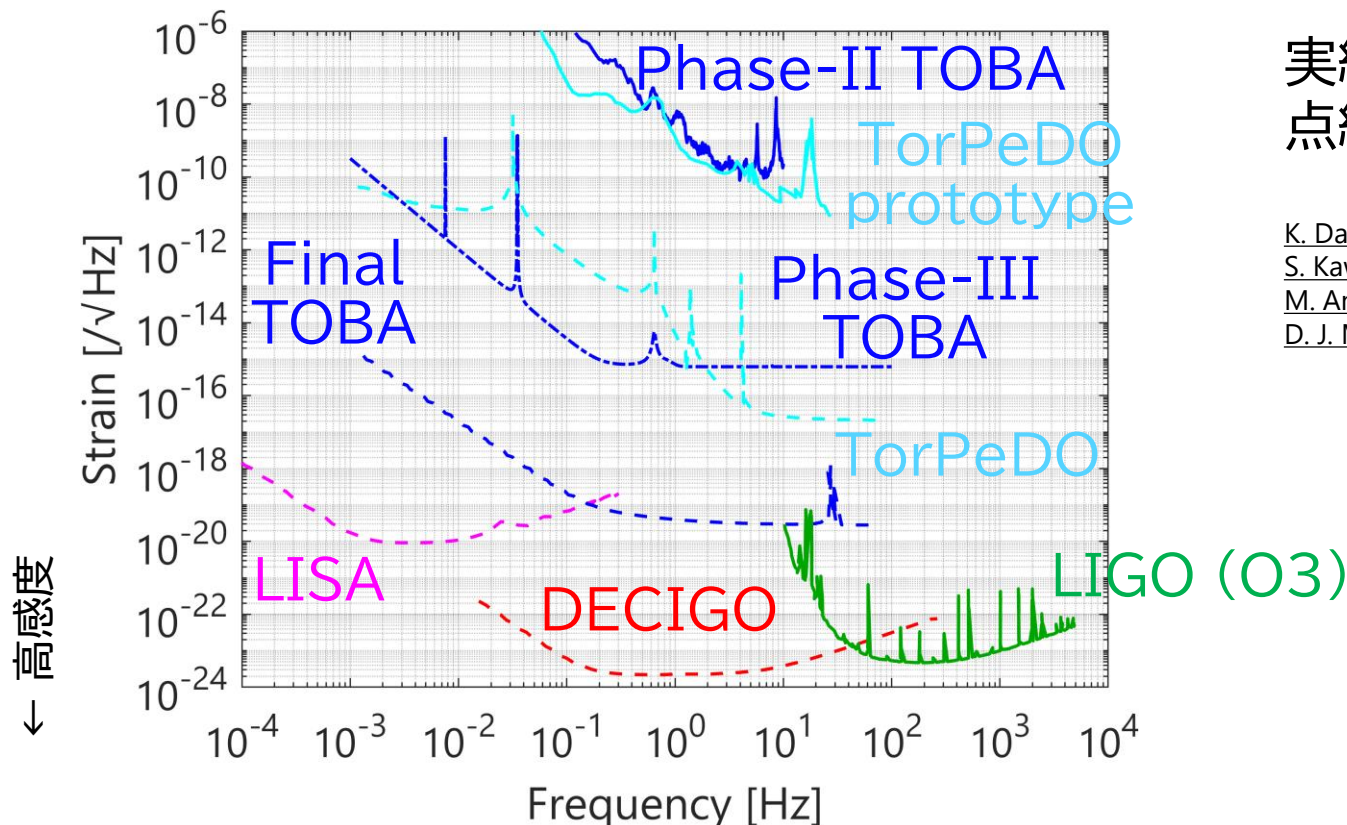
震源

M. Vallée+ (2017)



TOBAと他の検出器の比較

- 宇宙重力波望遠鏡: **LISA**・**DECIGO**
 - 重力波に対して地上検出器より良い感度
 - リアルタイムの地震観測は難しい
 - 開発コストがかかる・メンテナンスが難しい
- ねじれ振り子型: **TOBA**(東大)・**TorPeDO**(オーストラリア)



実線: 達成
点線: 提案

K. Danzmann+ (1996)
S. Kawamura+ (2008)
M. Ando+ (2010)
D. J. McManus+ (2017)

TOBAの開発ロードマップ

Phase-I TOBA
(2009-2011)

Phase-II TOBA
(2012-2014)

原理実証

10^{-8} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (達成)
20 cmテストマス
常温



Phase-III TOBA
(2018-現在)

雑音低減技術の確立
ニュートニアン雑音検出
地震速報

10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
35 cmテストマス
低温



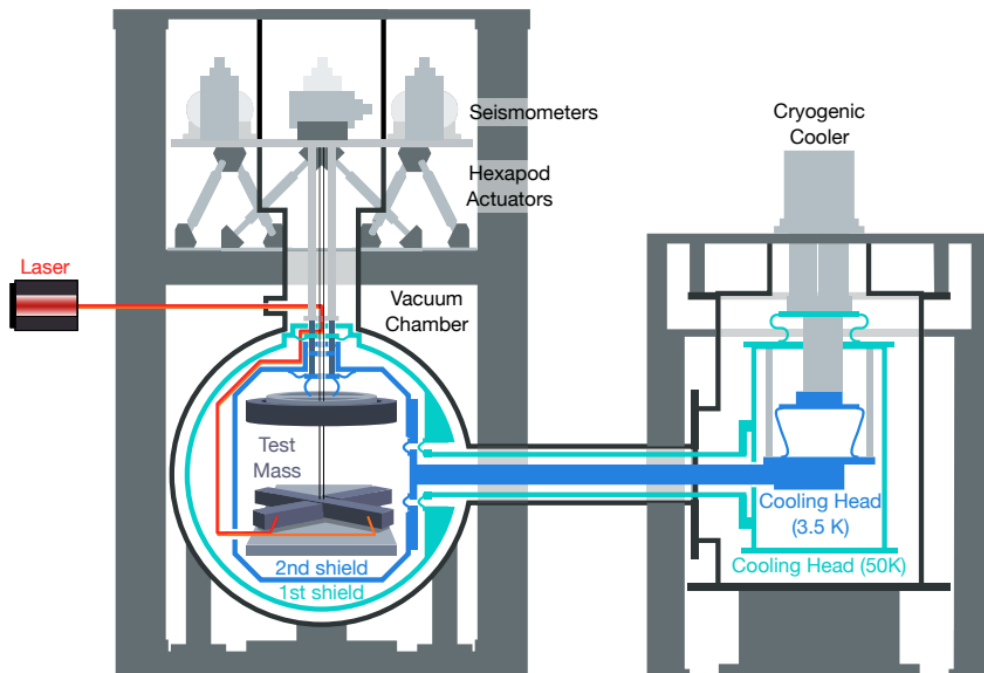
Final TOBA
(将来計画)

重力波観測

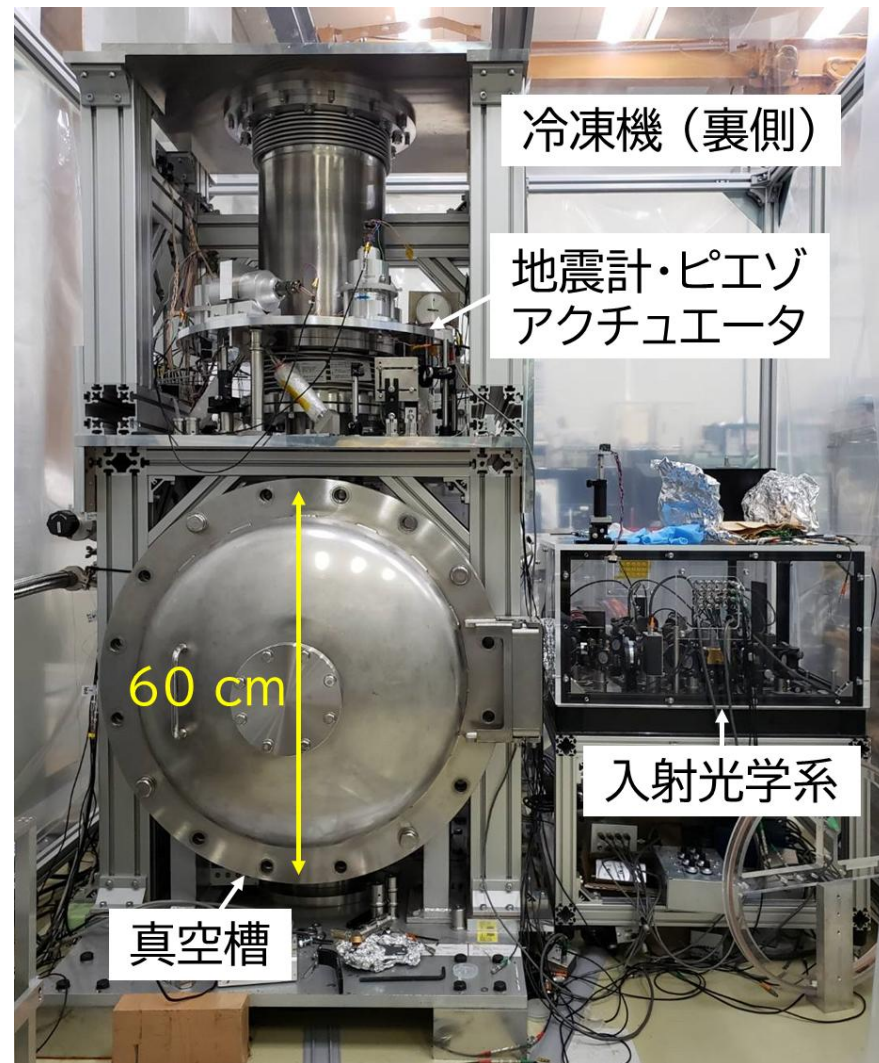
10^{-19} / $\sqrt{\text{Hz}}$ (目標)
10 mテストマス
低温

Phase-III TOBAの構成

- 光学系: ねじれ回転検出
- 懸架系: ねじれ振り子
- 冷却系: 振り子を低温化
- 防振系: 懸架点を能動防振

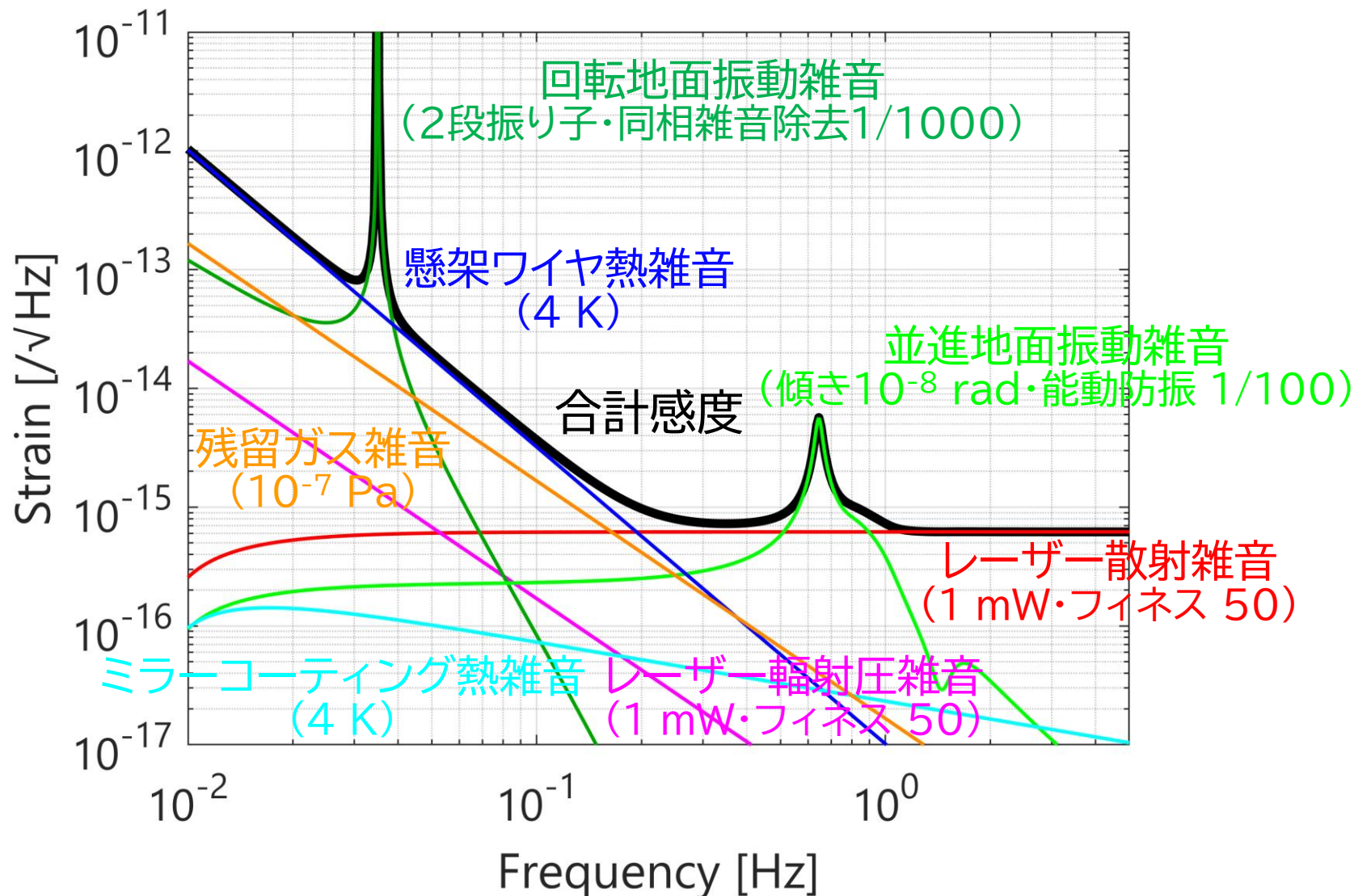


S. Takano, T. Shimoda, YO+ (2024)



Phase-III TOBAの目標感度・雑音源

- $3.7 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz

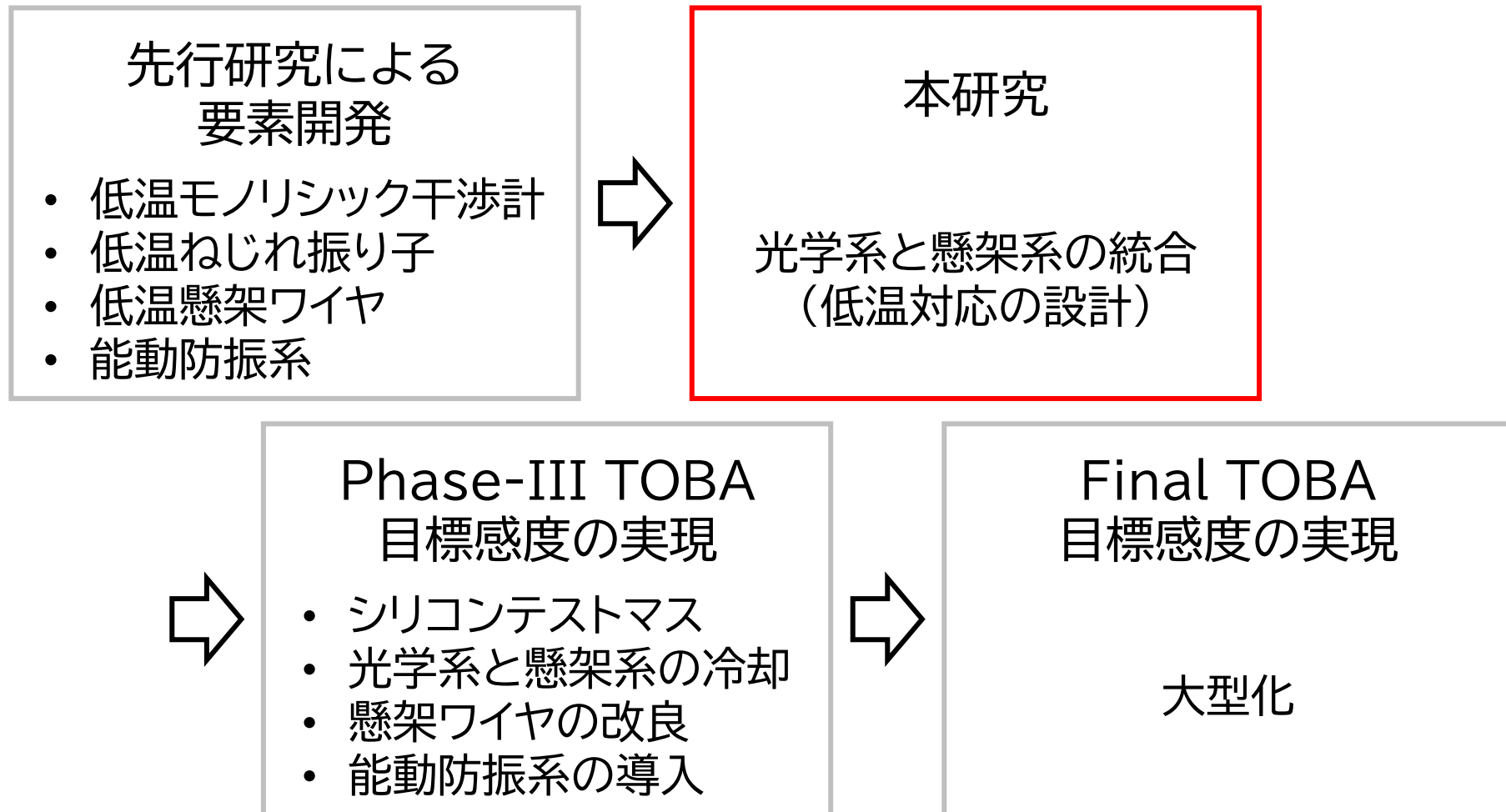


目次

- ねじれ振り子型重力勾配計TOBA
 - TOBAの原理・サイエンス
 - 開発ロードマップ
 - Phase-III TOBAの構成・目標感度
- Phase-III TOBAの光学系・懸架系の開発
 - 設計感度
 - 実験セットアップ
 - 結果・考察

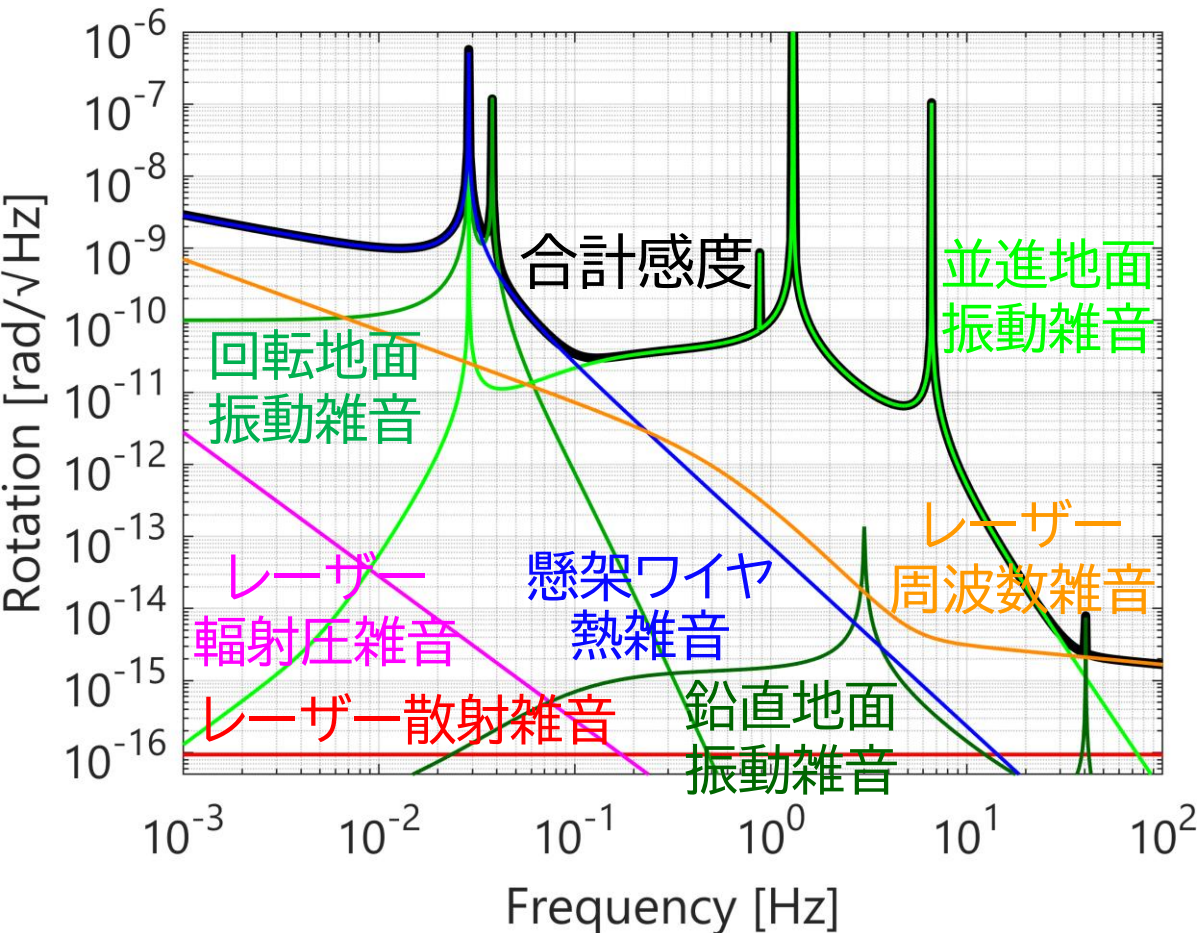
本研究の目的

- 要素開発で明らかになった課題をもとに
TOBAの光学系と懸架系を組み合わせた実験系を完成させる



本実験の設計感度

- 3.4×10^{-11} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz
 - 熱雑音と地面振動雑音で制限される



光学系

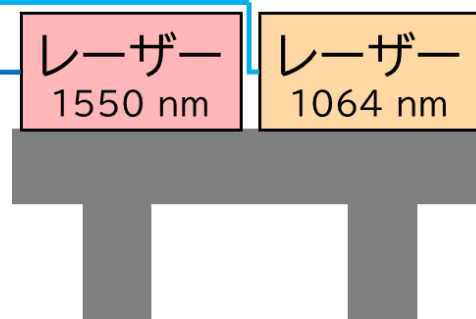
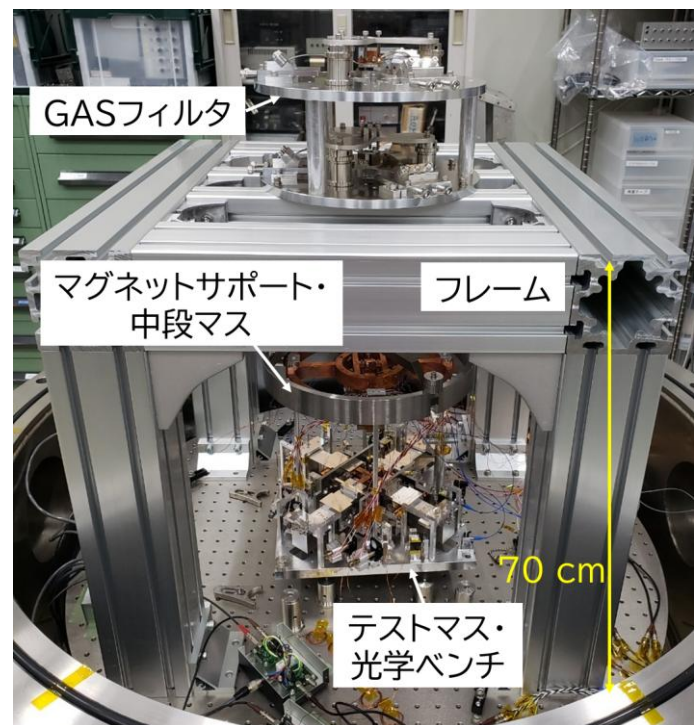
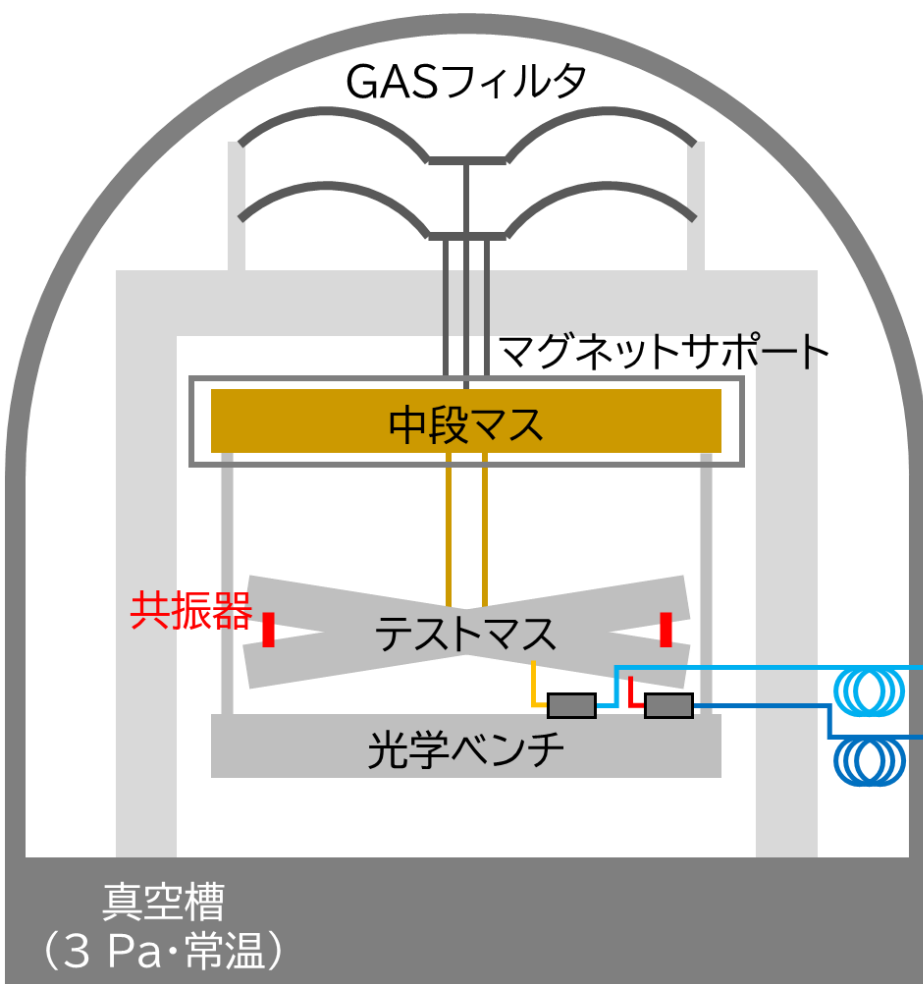
波長	1550 nm
パワー	1 mW
フィネス	300
共振器長	23 mm
共振器間距離	110 mm
同相雑音除去	1/50

懸架系

慣性モーメント	0.010 kg m ²
ワイヤ長	122 mm
ワイヤ直径	0.3 mm
ねじれ共振周波数	28.7 mHz
ワイヤQ値	10 ³
テストマス傾き	10 ⁻⁴ rad
共振器鏡傾き	10 ⁻⁴ rad
同相雑音除去	1/50
GAS共振周波数	3 Hz
温度	300 K

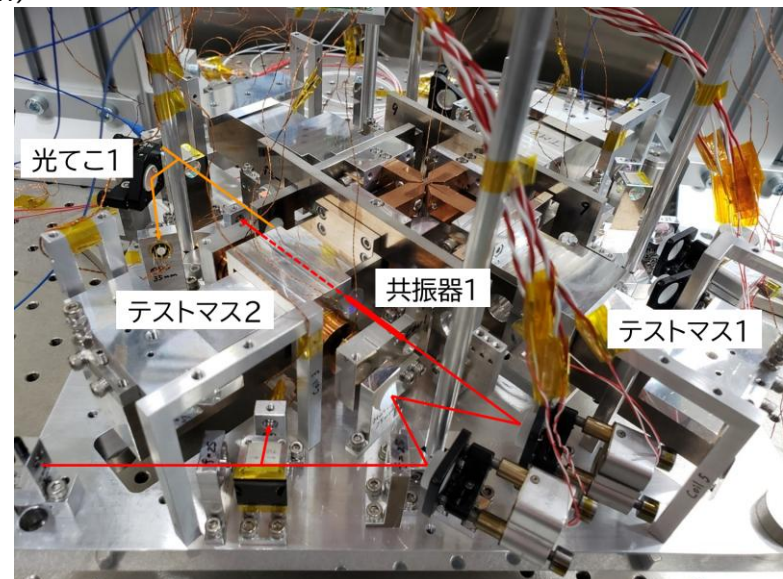
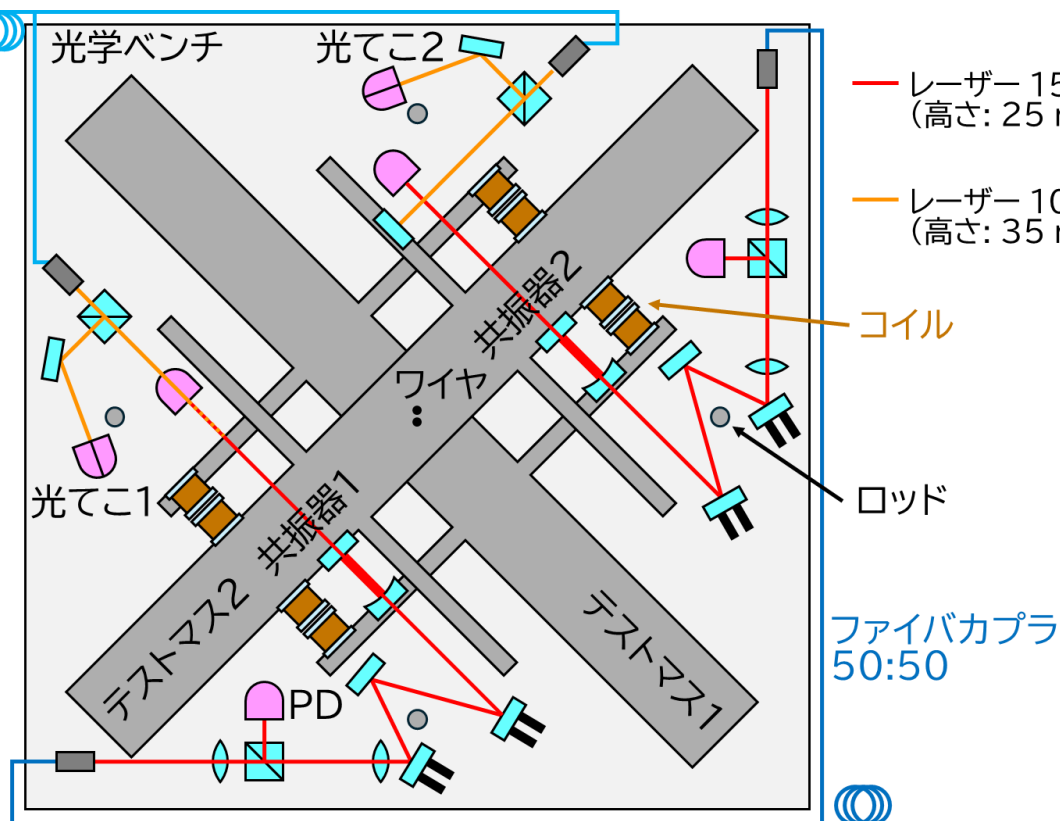
実験セットアップ全体の構成

- 真空槽内に懸架系・真空槽外にレーザー光源
- 光ファイバで光学ベンチにレーザーを導入



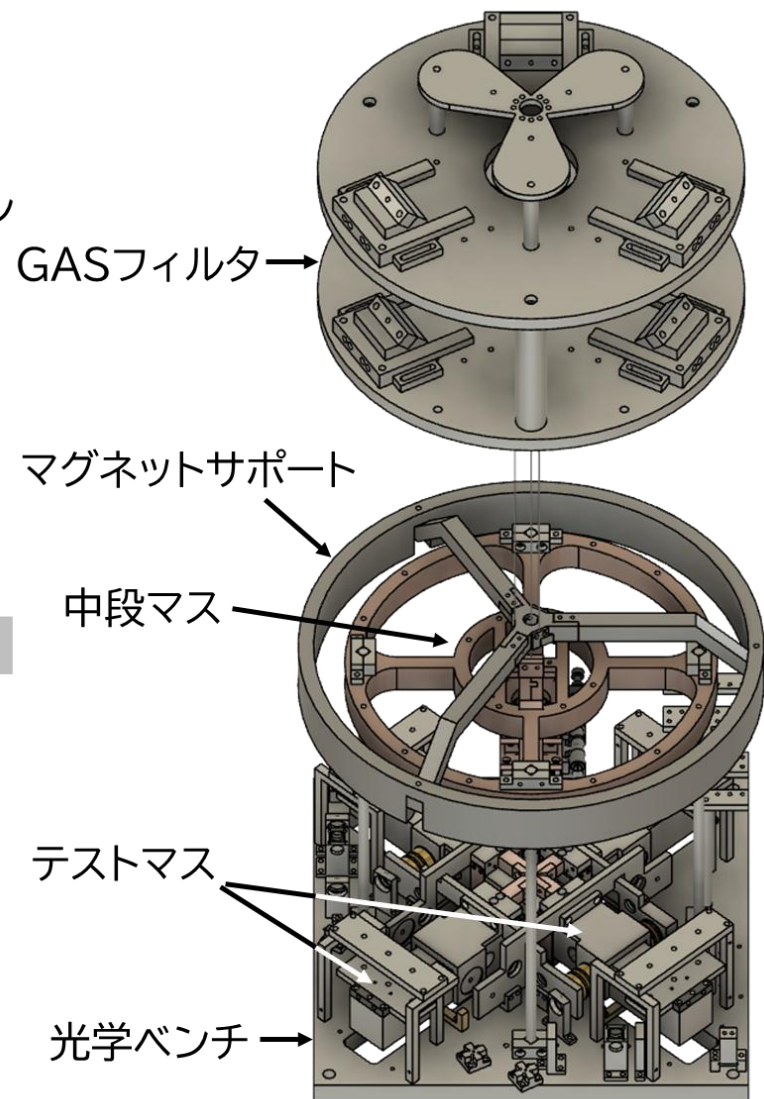
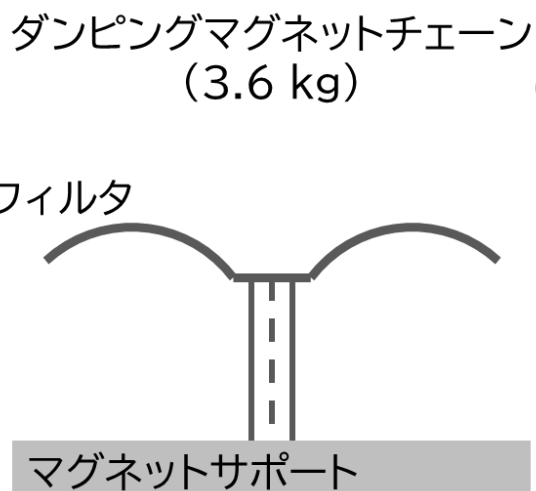
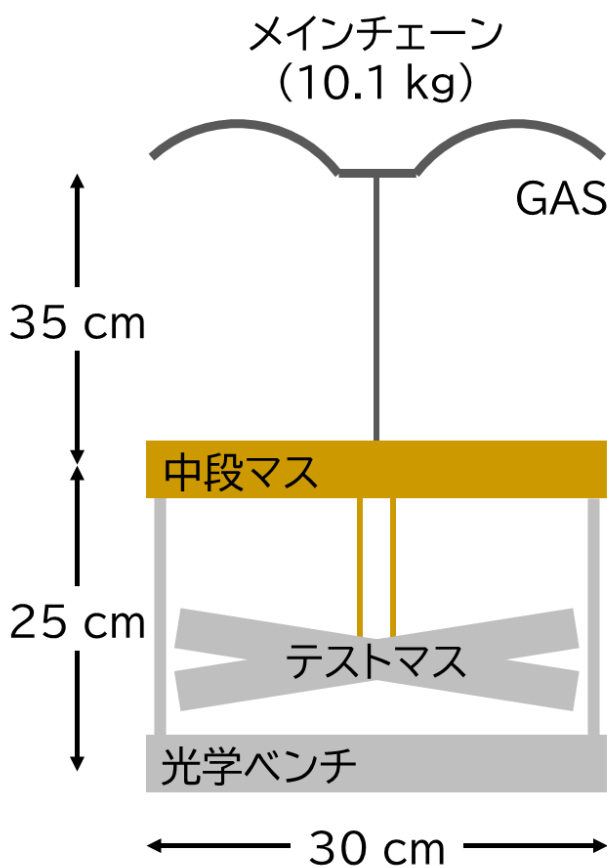
光学系の設計

- 2つのテストマス間で差動ファブリペロー共振器を構成
 - ねじれ回転を共振器の長さ変動の差として検出
 - コイル-コイルアクチュエータによるフィードバック制御でファブリペロー共振器の共振状態を保つ
- 補助センサとして光てこも設置



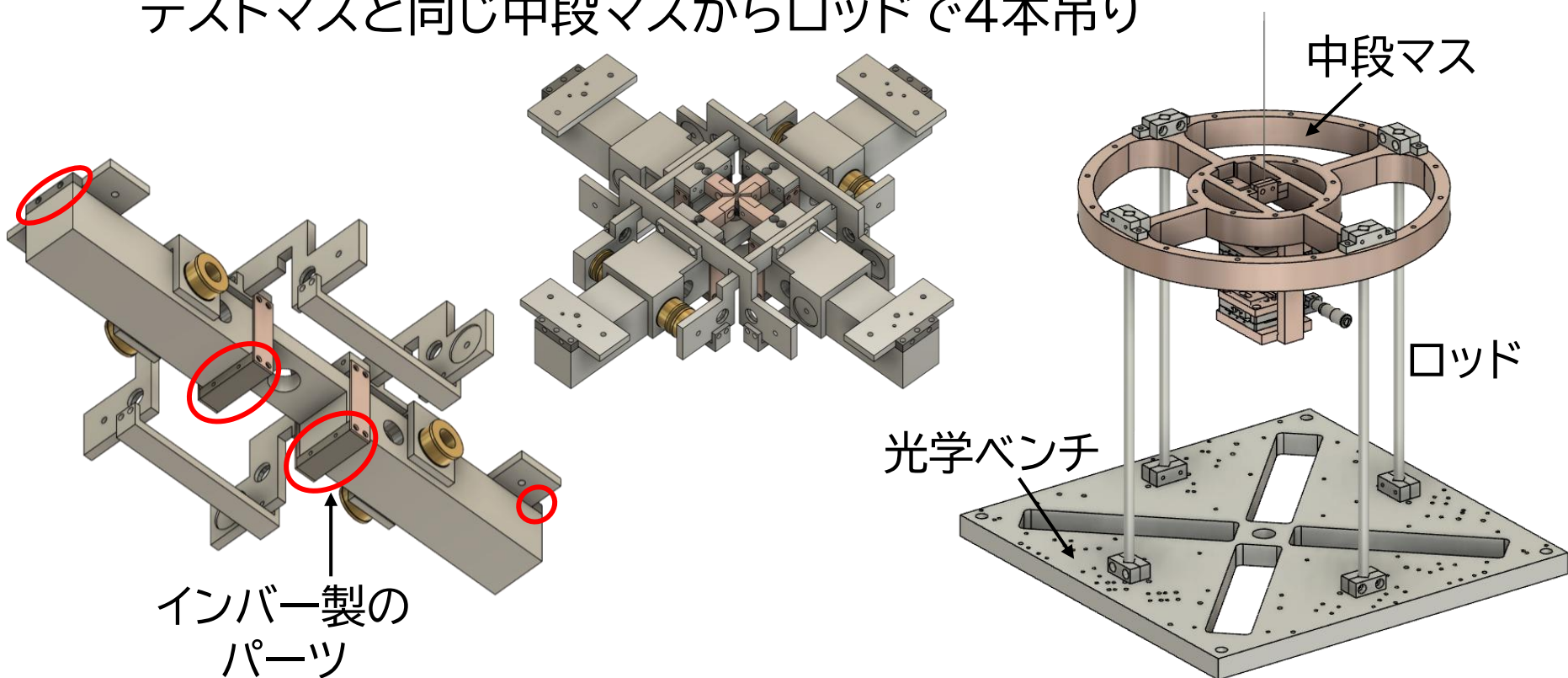
懸架系の設計: 全体

- 中段マスからテストマスと光学ベンチを懸架
- ダンピングマグネットも懸架
- 縦防振のためのGASフィルタの導入



懸架系の設計: テストマス・光学ベンチ

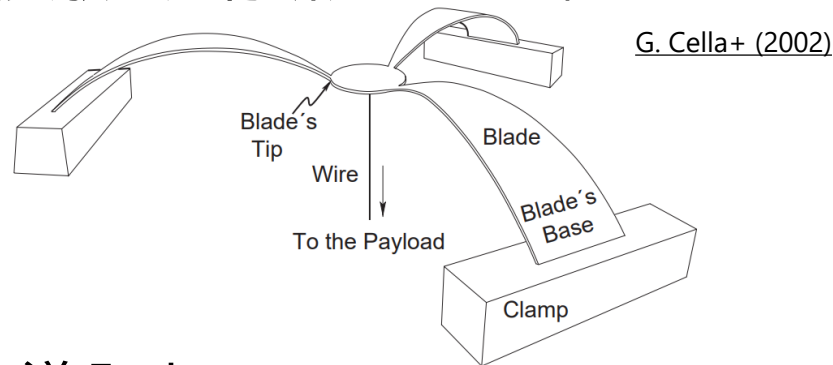
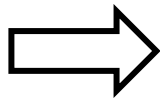
- 低温で特製の良いシリコンを使用予定
- 冷却中にシリコンが割れないようネジを使わずインバーを接着
- 本実験ではシリコンの代わりにアルミニウムを使用
 - シリコン: 2.33 g/cm^3 , アルミニウム: 2.7 g/cm^3
- 光学ベンチの振動雑音が問題とならないよう
テストマスと同じ中段マスからロッドで4本吊り



懸架系の設計: GASフィルタ

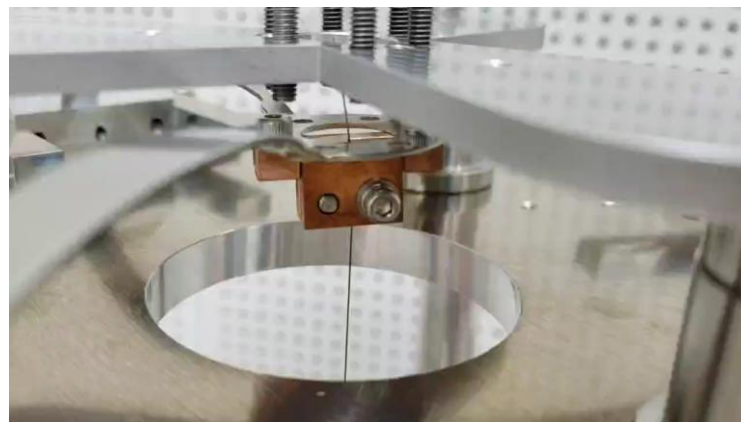
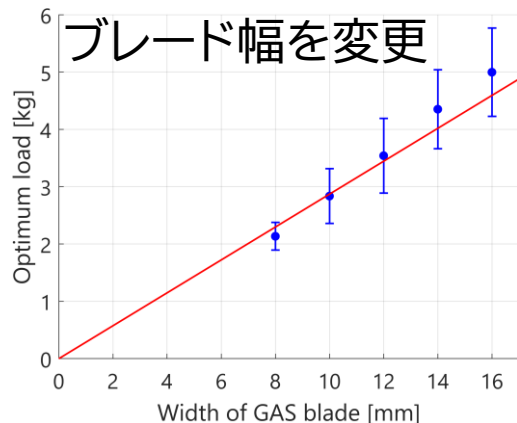
- Geometric Anti-Spring フィルタ

- 反ばね効果を利用して低周波数帯で縦防振を実現する装置
- マルエージング鋼を用いた大規模実験の先行研究はある (KAGRAなど)



- TOBAにGASフィルターを初めて導入する

- 入手容易で安価なSUS304ばね材を用いる (先行研究なし)
- 複数のブレードを製作してブレードの最適な幅と厚み選定した

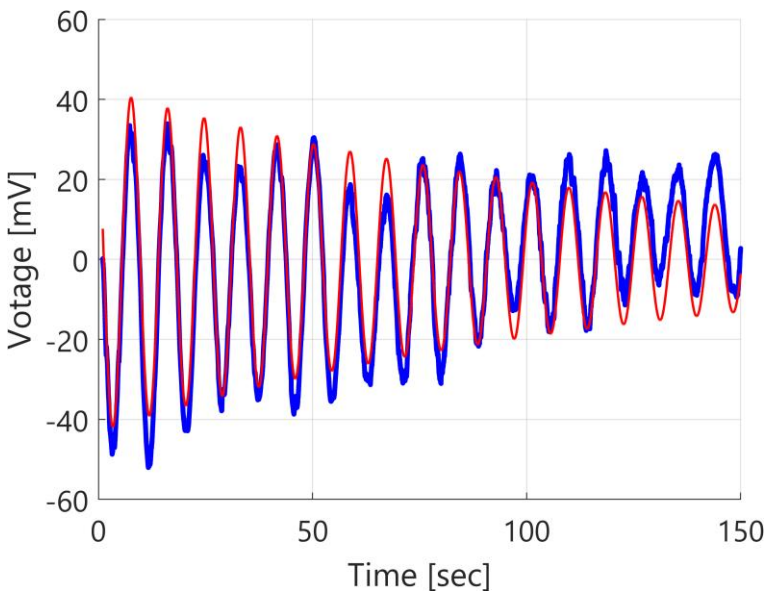


結果のまとめ

		本研究の結果	本研究の設計値	Phase-III TOBA 設計値
光学系	光てこ	回転検出	補助センサ	補助センサ
	差動 ファブリペロー 共振器	フィネス ~300 TOBA初の導入 アンロック	フィネス 400 ロックして回転検出	フィネス 50 ロックして回転検出
懸架系	テストマス	アルミニウム製(シリコン仕様) TOBA初の設計		シリコン製
	ねじれ 共振周波数	117 mHz	28.7 mHz	7.7 mHz
	ねじれQ値	~50	10^3	10^8
	テストマス傾き	$\sim 2 \times 10^{-3}$ rad	10^{-4} rad	10^{-8} rad
	GASフィルタ 共振周波数	TOBA初の導入 3-4.5 Hz	3 Hz	3 Hz
冷却系	温度	300 K	300 K	4 K
感度 @ 0.1 Hz		3×10^{-7} / $\sqrt{\text{Hz}}$	3×10^{-11} / $\sqrt{\text{Hz}}$	4×10^{-15} / $\sqrt{\text{Hz}}$

振り子の評価: ねじれ共振周波数・Q値

- コイル-コイルアクチュエータでねじれモードを励起し
励起を止めた後の減衰振動を用いて測定 (リングダウン法)
- 大気圧下と真空下で測定

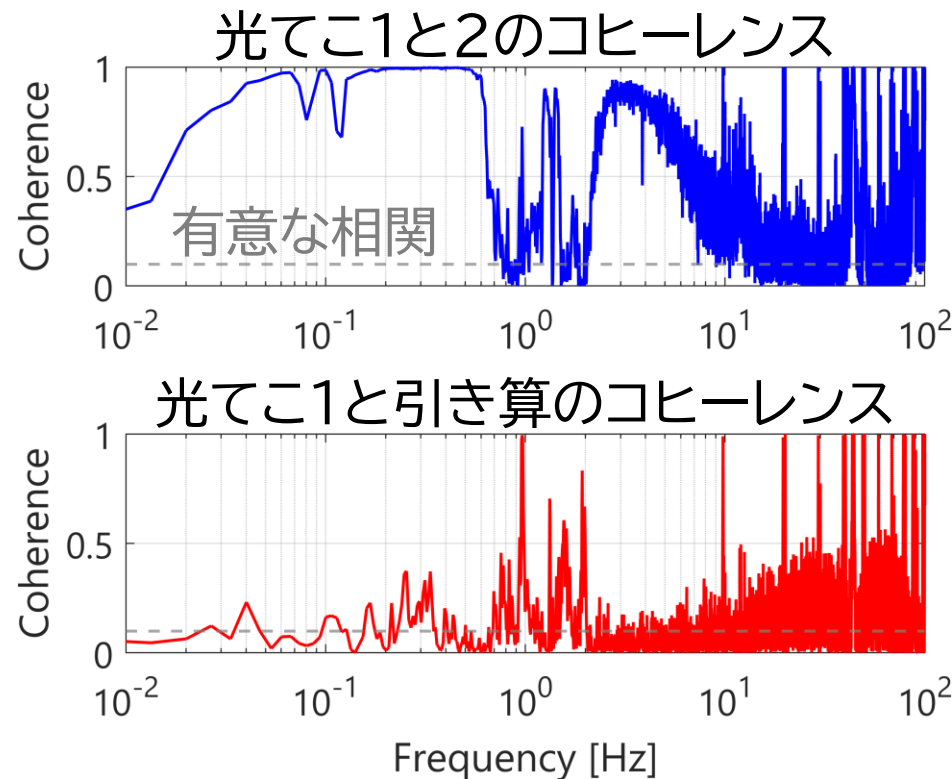
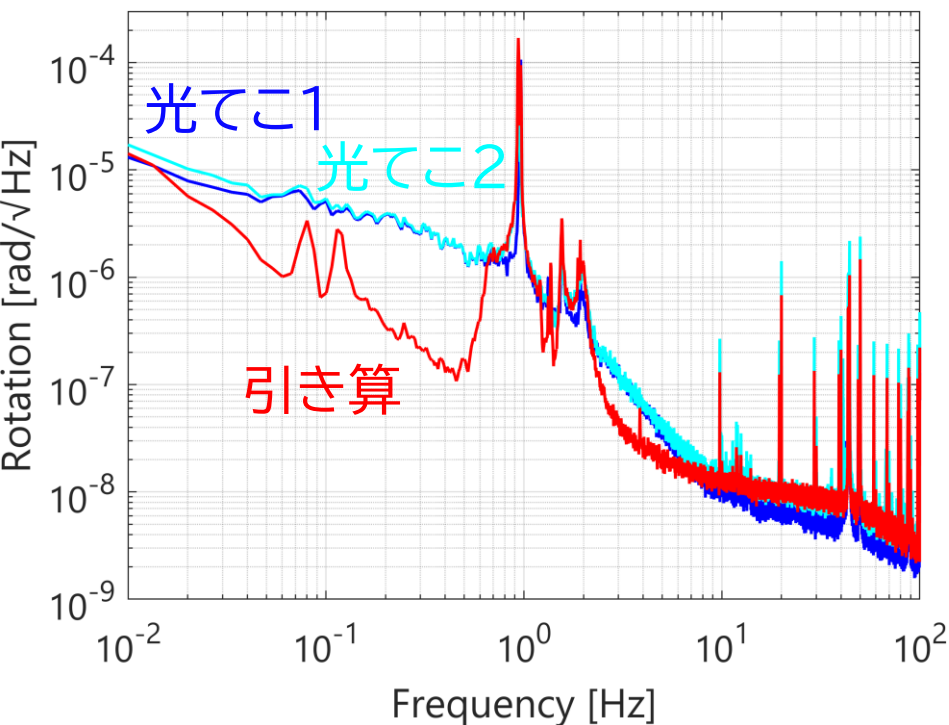


	設計値	テストマス1	テストマス2
共振周波数 [mHz]	28.7	117.9±0.1 (大気圧)	117.9±0.1 (大気圧)
		117.1±0.1 (3.5 Pa)	117.3±0.1 (3.5 Pa)
Q値	1000	55.2±0.4 (大気圧)	39.8±0.2 (大気圧)
		66.8±1.5 (3.5 Pa)	46.5±0.3 (3.5 Pa)

- コイルのワイヤによりねじれの復元力が大きくなったため
→ より細いワイヤの使用 / 非接触での電流供給 /
コイル-コイルアクチュエータを使わない共振器制御

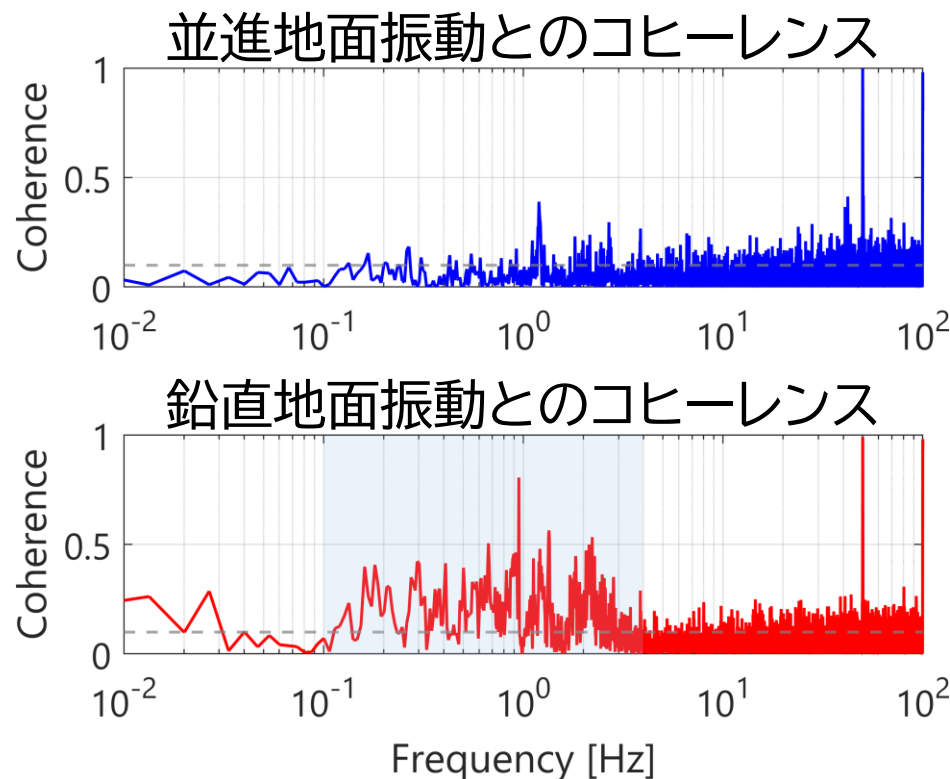
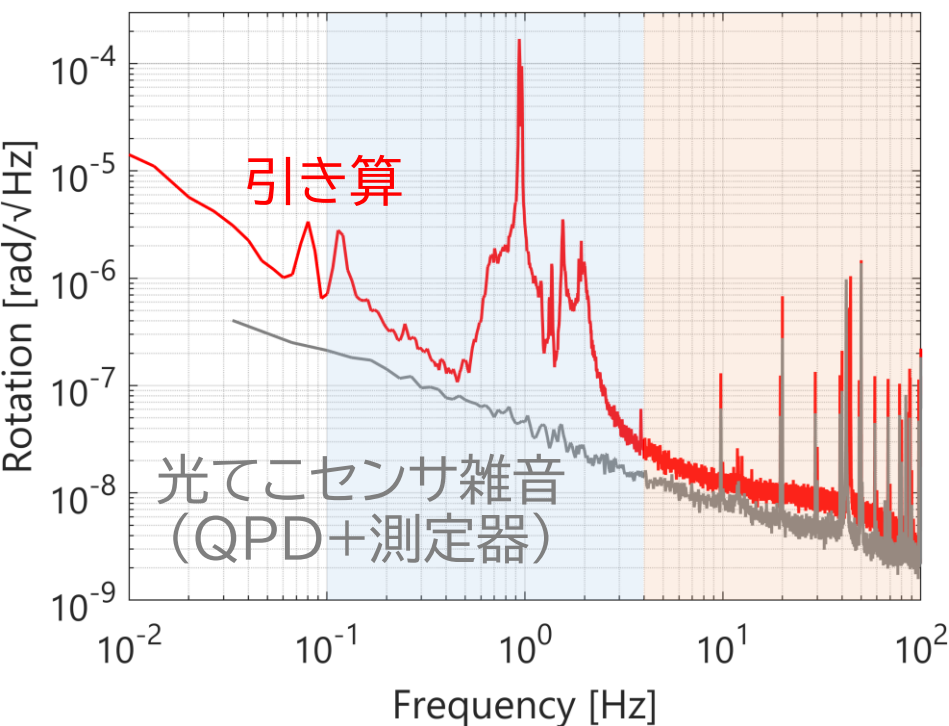
回転感度

- 光てこで回転測定を行った
- 2つのテストマス間で同相雑音除去
- 1.1×10^{-7} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.4 Hz



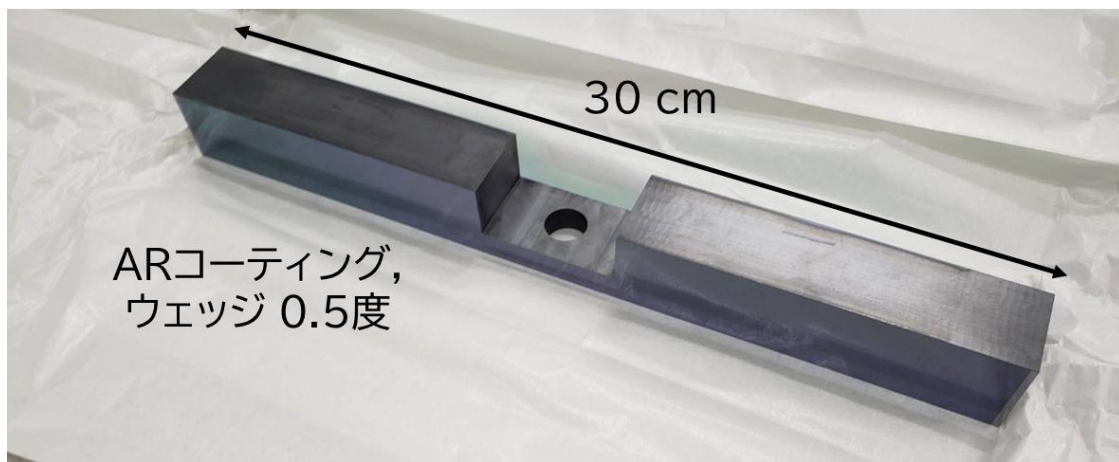
雑音源・感度向上に向けての考察

- 4 Hz以上は光てこのセンサ雑音が支配的
→ 共振器での検出にすることで感度向上が期待できる
- 0.1 Hz-4 Hzでは鉛直方向の地面振動雑音と有意な相関がある
→ テストマスの傾き低減 / 鏡の傾き低減 /
GASフィルタの共振周波数低減が必要



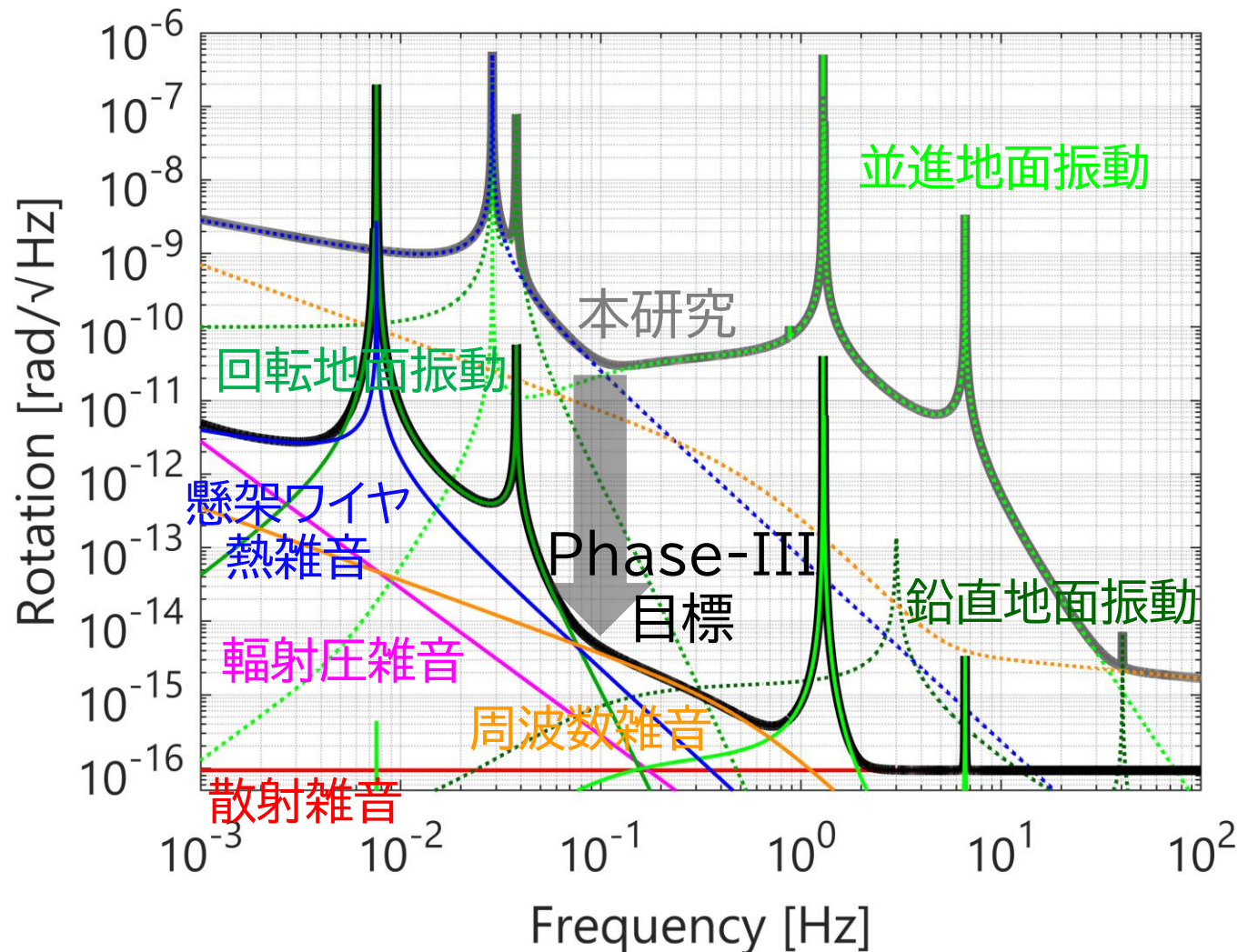
今後の展望

- ファブリペロー共振器をロックしねじれ回転を計測する
- テストマスをシリコンに置き換え冷却
 - ・ 反射コーティングを施したテストマス調達済み



今後の展望

- 懸架ワイヤ熱雑音・地面振動雑音・レーザー周波数雑音の低減
→ Phase-III TOBAの完成へ



● 熱雑音

- 温度: 300 K → 4 K
- ベリリウム銅 → シリコン
- Q値: 10^3 → 10^8

● 地面振動雑音

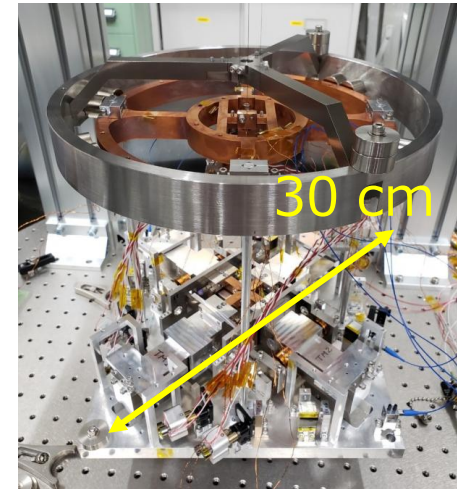
- 能動防振 1/100
- テストマス傾き:
 10^{-4} rad → 10^{-8} rad
- 共振器鏡傾き:
 10^{-4} rad → 10^{-6} rad

● 周波数雑音

- 安定化 1/1000

まとめ

- 低周波重力波・地震の観測を目指し
ねじれ振り子型重力勾配計Phase-III TOBAを開発中
- 光学系と懸架系を組み合わせた設計・開発
 - 差動ファブリペロー共振器(TOBA初)・光てこ
 - 低温シリコン仕様・アルミニウム製のねじれ振り子
 - 縦防振のためのGASフィルタ(TOBA初)
- 性能評価と光てこによる回転計測を行った



→ 本研究はPhase-III TOBAの光学系と懸架系の構成を確立した

JSRフェローシップに支援していただき
研究に専念することができました

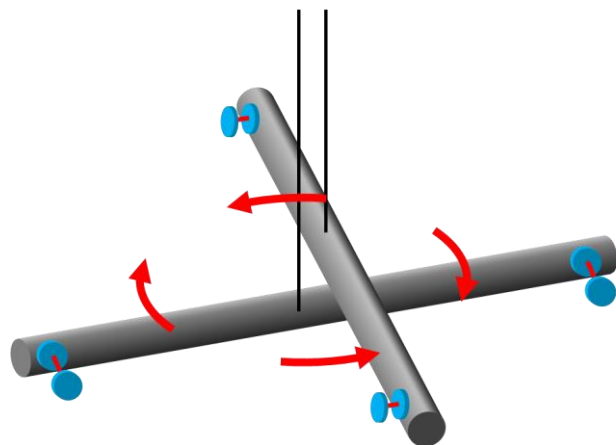
楽しいイベントを通してJSR・他の研究室の皆様と
知り合うことができたことも嬉しく思います

ありがとうございました

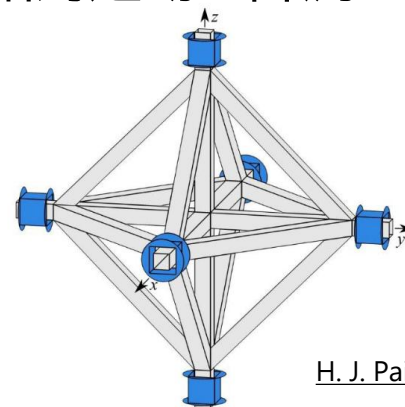
補助スライド

提案・開発されている重力勾配計

- ねじれ振り子型
 - ねじれ振り子の回転を計測

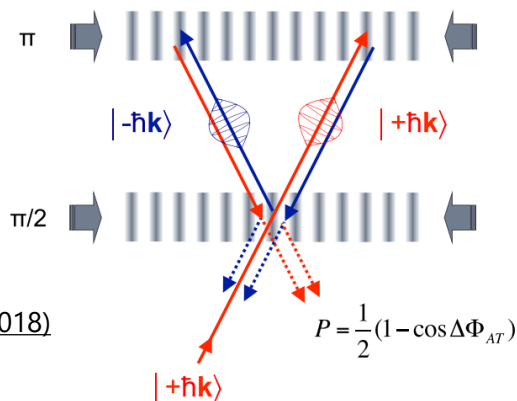


- 超伝導型:
 - 超伝導浮上した複数のマスの相対運動を計測



H. J. Paik+ (2020)

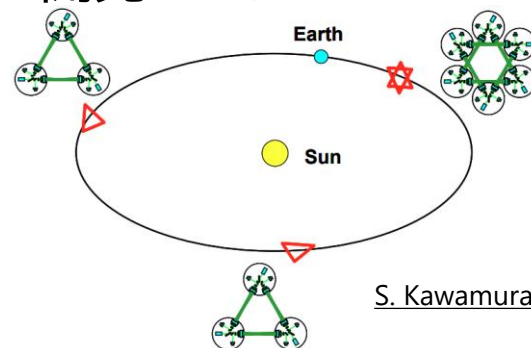
- 原子干渉計型:
 - 自由落下する原子の物質波干渉を利用



B. Canuel+ (2018)

$$P = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\Phi_{AT})$$

- 宇宙重力波望遠鏡
 - 衛星間レーザー干渉計
 - 地上検出器より良い感度
 - 開発コストがかかる

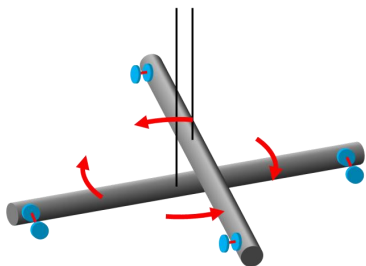


S. Kawamura+ (2008)

重力勾配計の比較

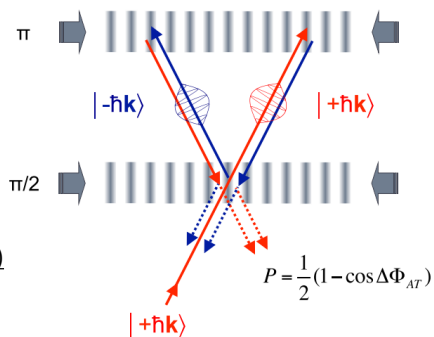
- **ねじれ振り子型**

- レーザー散乱雑音と熱雑音
- 技術が実証されている
- オフライン雑音除去が可能
- 常温でも運転可能



- **原子干渉計型:**

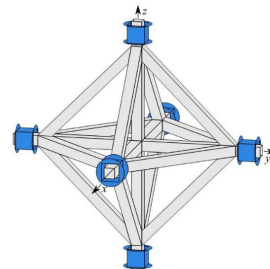
- 原子数による散乱雑音
- 技術実証中
- 数kmスケール



B. Canuel+ (2018)

- **超伝導型:**

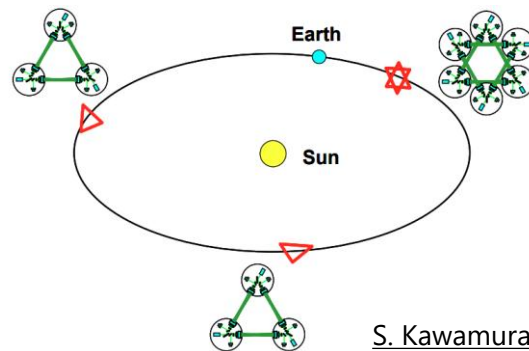
- SQUID散乱雑音と熱雑音
- 技術が実証されている
- 再現性が高く
オフライン雑音除去が容易



H. J. Paik+ (2020)

- **宇宙重力波望遠鏡**

- 地上検出器より良い感度
- 開発コストがかかる



S. Kawamura+ (2008)