
重力波検出器における ポンデロモータィブスキューズ を利用した輻射圧雑音除去の研究

阪田紫帆里, 宮川治, 森岡友子, Volker Leonhardt, 川村静児, 佐藤修一,
沼田健司, 西澤篤志, 山崎利孝, 福嶋美津広, 三代木伸二, 古澤明, 菅本晶夫

2007年12月7日 重力波研究交流会@東京大学 本郷キャンパス

発表目次

1. 実験概要

- » 実験目的
- » 概念設計

2. 実験

- » 実験装置
- » 実験現状
 - 10 μ m石英ファイバーで吊られた重さ23mgの鏡による懸架系の組立
 - その懸架系を用いたファブリペロ共振器の組み立て

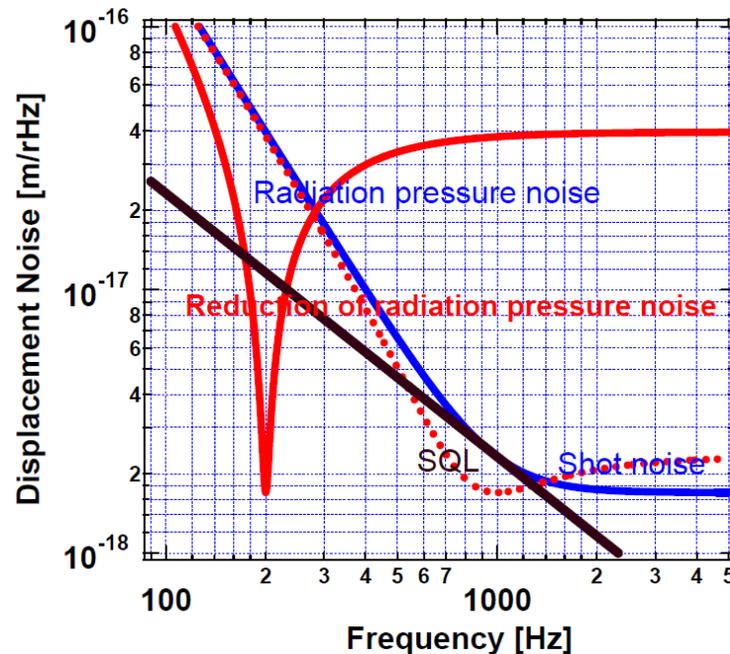
3. まとめと今後の課題

1. 実験概要

■ 実験目的

- » 輻射圧雑音の観測
- » 輻射圧雑音の除去

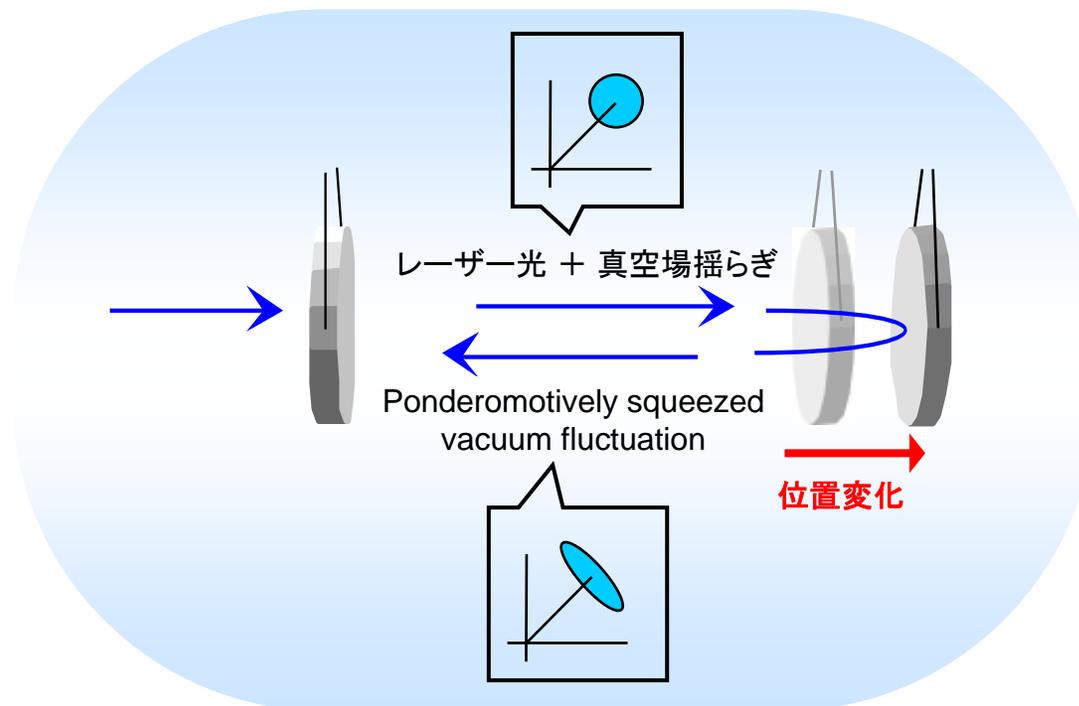
– 低周波での観測が必要なため、今までに成功した例はない



ポンデロモーティブスキージング

■ ポンデロモーティブスキージングとは

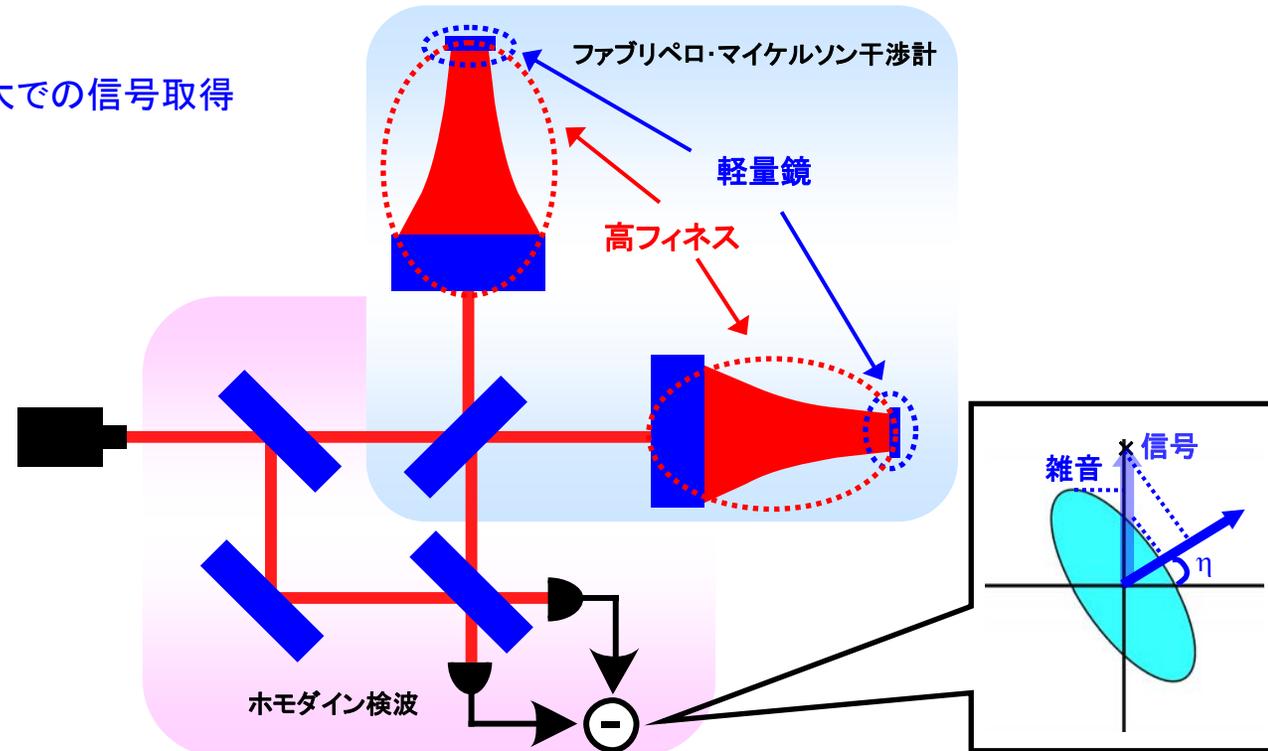
- » 真空場揺らぎの強度揺らぎが位相揺らぎに現れることによるスキーズ
 - レーザー光と真空場揺らぎの輻射圧力による位置変化



実験セットアップ

■ 実験セットアップ

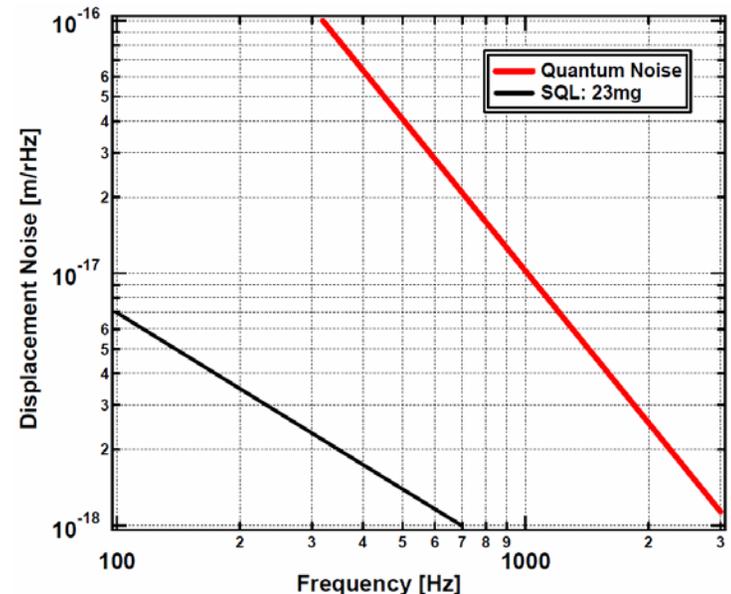
- » ホモダイン検波付きファブリペロ・マイケルソン干渉計
 - 軽量鏡・高フィネスのファブリペロ共振器
 - ホモダイン検波
 - S/N比が最大での信号取得



輻射圧雑音

■ 輻射圧雑音の観測/除去のために

- » 輻射圧雑音: $D_{rp} = 1 \times 10^{-17} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{23[\text{mg}]}{M} \right) \left(\frac{\mathcal{F}}{10000} \right) \left(\frac{P}{120[\text{mW}]} \right)^{1/2}$
 - M: 換算質量
 - \mathcal{F} : フィネス
 - P: レーザーパワー
- » 鏡のスペック決定のための条件
 - 周波数1kHz辺りでの観測/除去
 - 目標感度: $1 \times 10^{-17} \text{ [m}/\sqrt{\text{Hz}}]$
 - 鏡の熱雑音/振り子の熱雑音の大きさを輻射圧雑音よりも一桁ほど小さくする
- » 輻射圧雑音の除去
 - 6 dBスキージングを期待



鏡の熱雑音

■ 鏡の熱雑音

» Internal Brownian Noise:

$$D_{\text{inBN}} = 1.5 \times 10^{-18} [\text{m} / \sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{10^5}{Q_{\text{cav}}} \frac{350 [\mu\text{m}]}{\omega_{\text{cav}}} + \frac{10^5}{Q_{\text{flat}}} \frac{340 [\mu\text{m}]}{\omega_{\text{flat}}} \right)^{1/2}$$

- $Q_{\text{cav}}/Q_{\text{flat}}$: フロントミラー/エンドミラーでのQ値

- $\omega_{\text{cav}}/\omega_{\text{flat}}$: フロントミラー/エンドミラーでのビームウェスト

» Coating Brownian Noise:

$$D_{\text{coatBN}} = 1 \times 10^{-18} [\text{m} / \sqrt{\text{Hz}}] \left(\frac{\phi_{\text{coat}}}{4 \times 10^{-4}} \frac{L_{\text{cav}}}{26} \left(\frac{350 [\mu\text{m}]}{\omega_{\text{cav}}} \right)^2 + \frac{\phi_{\text{coat}}}{4 \times 10^{-4}} \frac{L_{\text{flat}}}{40} \left(\frac{340 [\mu\text{m}]}{\omega_{\text{flat}}} \right)^2 \right)^{1/2}$$

- $L_{\text{cav}}/L_{\text{flat}}$: フロントミラー/エンドミラーでのコーティング枚数

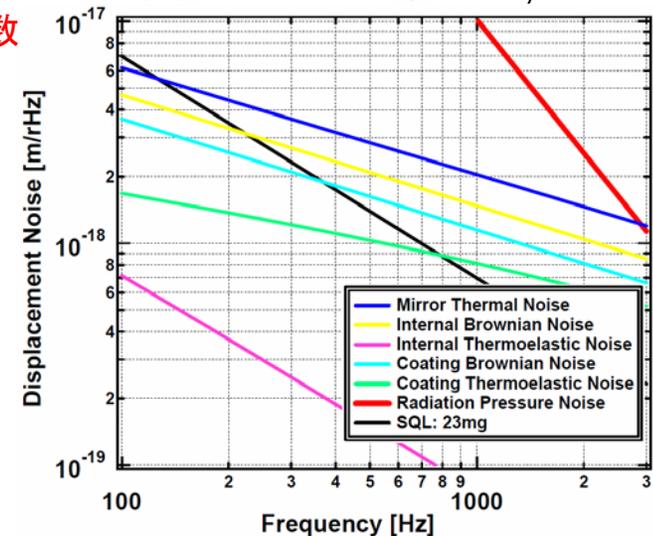
- 鏡の熱雑音はBrownian Noiseで制限
- それぞれの材質内に一応に存在する損失に由来

» Internal and Coating Thermoelastic Noise

- 熱弾性効果による損失に由来

■ 軽量鏡でのビームウェストの大きさに制限

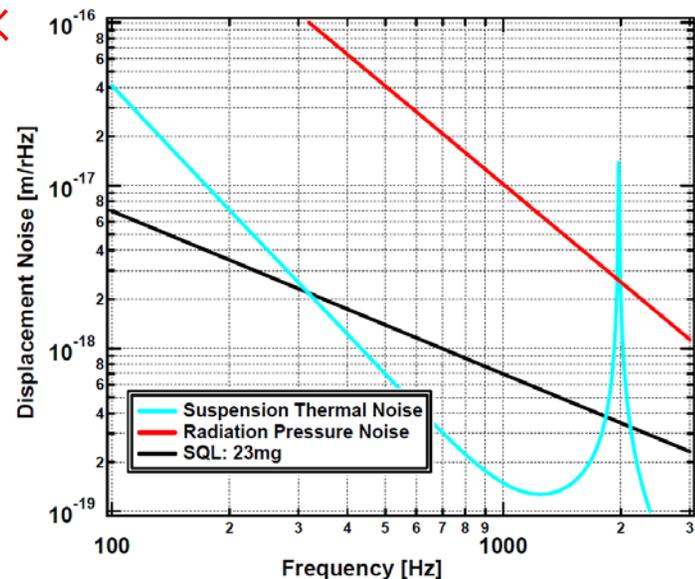
» Beam/Power loss: 10 ppm以下に抑えるため



振り子の熱雑音

■ 振り子の熱雑音

- › 基本的にファイバーのloss angleで制限される
 - 石英ファイバーの厚さ/長さ: $10\ \mu\text{m} / 1\ \text{cm}$
 - 本実験ではQ値の高い石英ファイバーを使用
 - 厚さ $10\ \mu\text{m}$ の石英ファイバーのloss angle: 4.7×10^{-6}
- › 鏡の重さとファイバーの太さのバランスが重要
 - 鏡の重さが軽すぎる場合: 振り子から剛体棒に近づく
 - ファイバーの太さが $10\ \mu\text{m}$ 以下の場合:
ファイバーのQ値が急激に悪化
 - ファイバーの表面積が小さすぎる

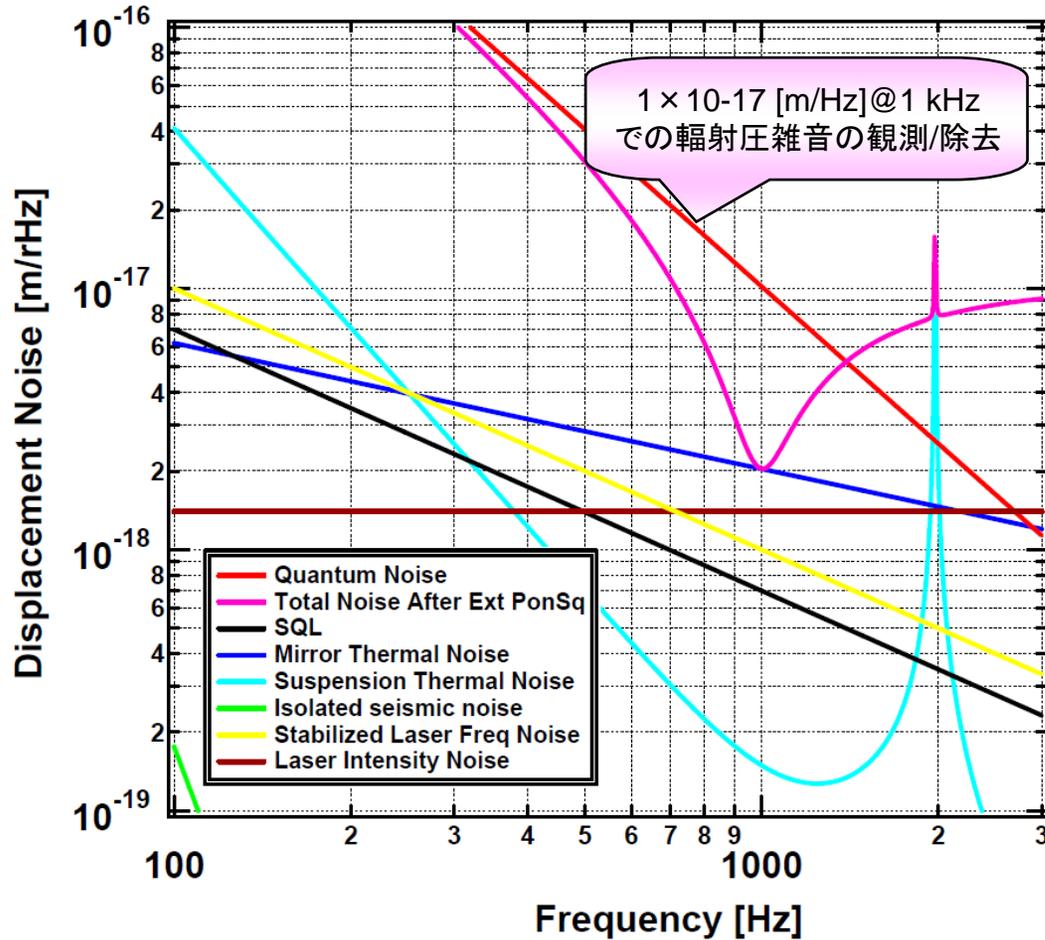


その他の主な雑音源

■ 必要な雑音除去

- » 目標感度: 1×10^{-17} [m/rHz]@1 kHz
 - 量子雑音以外の雑音: 1×10^{-18} [m/rHz]@1 kHz 以下
- » 主な雑音源
 - 地面振動: 1×10^{-13} [m/rHz]@1 kHz
 - 必要な防振比: 100dB
 - レーザー周波数雑音: 1×10^{-15} [m/rHz]@1 kHz
 - 3桁の雑音除去
 - レーザー強度雑音: 1.5×10^{-18} [m/rHz]@1 kHz
 - 残留ガスによる雑音
 - 必要な真空度: 10^{-4} Pa

Noise Budget



レーザーパワー	200 mW
干渉計入射パワー	120 mW
フィネス	10000
エンドミラーの重さ	23 mg
エンドミラーの直径	3 mm
エンドミラーの厚さ	1.5 mm
フロントミラーの重さ	14 g
エンドミラーの反射率	99.999 %
フロントミラーの反射率	99.94 %
フロントミラーのロス	30 ppm
エンドミラーのビーム半径	342 mm
基材のQ値	10 ⁵
コーティングのロス	4 × 10 ⁻⁴
温度	300 K
石英ファイバーの長さ	1 cm
石英ファイバーの厚さ	10 μm

※ 干渉計等のロスを考慮した場合の観測可能なスクイズレベル: 6 dB

2. 実験現状

■ 実験装置の組立

» ファブリペロ・マイケルソン干渉計 with ホモダイン検波

– 防振装置

- 2段スタックの導入
- 干渉計を2段振り子で吊る

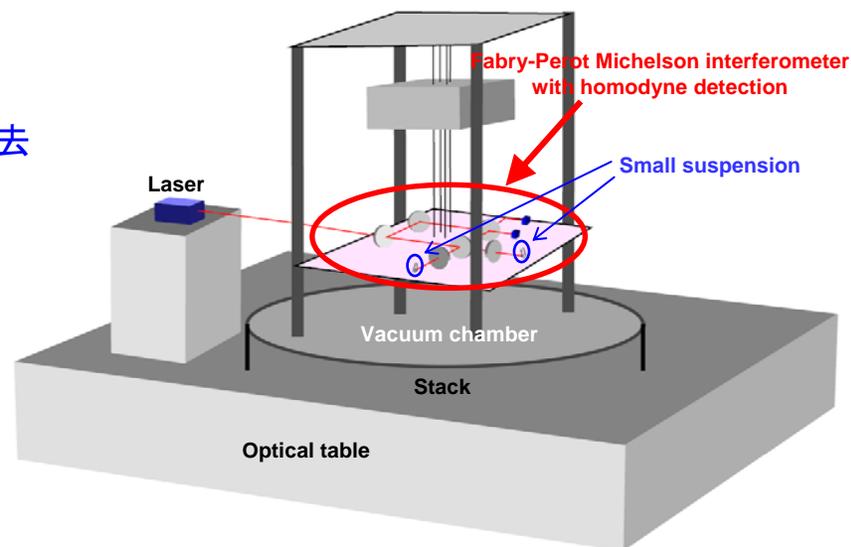
– One locked FP cavity

– Two locked FP cavities

– ファブリペロ・マイケルソン干渉計

- レーザー周波数安定化: 3桁の雑音除去
 - » Reference cavityの導入
 - » 目標CMRR: 1/100

– ホモダイン検波



本実験の難問題

- ✓ 重さ23mg石英鏡による振り子の組立
 - » 直径10 μ m石英ファイバーでの懸架
- ✓ この振り子を用いたファブリペロ共振器の動作
- ✓ 干渉計の感度向上
- 輻射圧力によるDC的長さ変化と振り子の角度揺れの制御

2. 実験現状

■ 実験装置の組立

» ファブリペロ・マイケルソン干渉計 with ホモダイン検波

✓ 防振装置

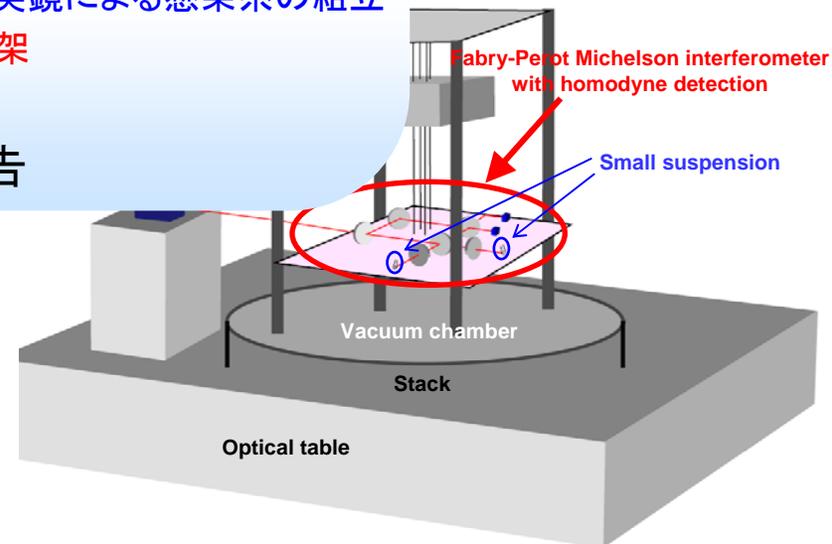
- 2段スタックの導入
- 干渉計を2段振り子で吊る

✓ One locked FP cavity

- 重さ23mg (直径: 3mm, 厚さ: 1.5mm)の石英鏡による懸架系の組立
 - » 厚さ10 μ m石英ファイバーにより懸架
- ファブリペロ共振器の組立

➡ 本発表で結果報告

- Two locked FP cavities
- ファブリペロ・マイケルソン干渉計
 - レーザー周波数安定化: 3桁の雑音除去
 - » Reference cavityの導入
 - » 目標CMRR: 1/100
- ホモダイン検波



防振装置

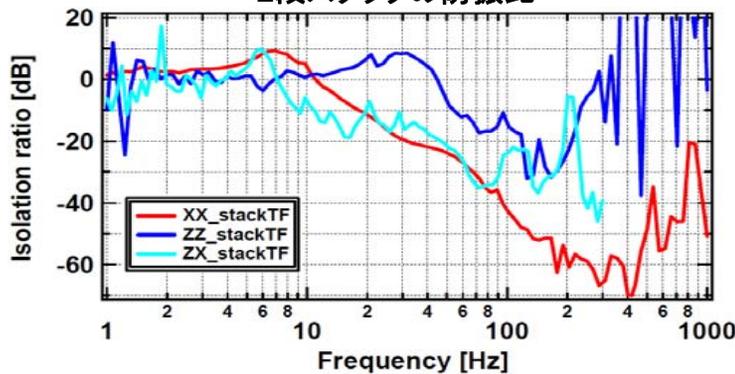
■ 防振比の測定

- » 必要な防振比: 100 dB@1 kHz
 - 1 kHz付近の測定はセンサー雑音で制限

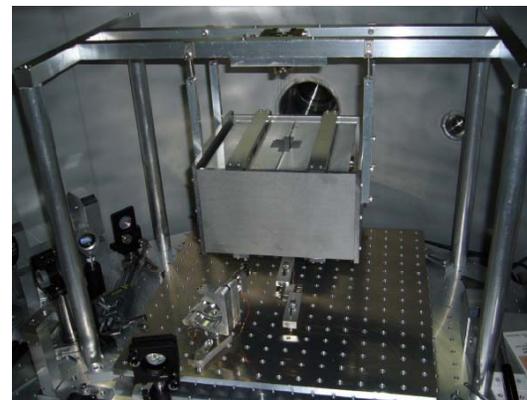
2段スタック



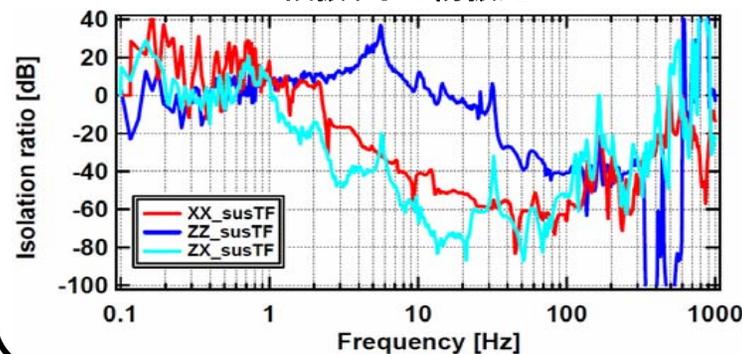
2段スタックの防振比



2段振り子



2段振り子の防振比



23mg石英鏡による振り子の組立 I

■ 重さ23mgの石英鏡による振り子の組立

- » 厚さ $10\mu\text{m}$ /長さ 1cm 石英ファイバーにより懸架
 - 振り子の熱雑音が基本的にファイバーのloss angleで制限されるため
 - 厚さ $10\mu\text{m}$ の石英ファイバーのloss angle: 4.7×10^{-6}
 - ファイバーの太さが $10\mu\text{m}$ 以下の場合: ファイバーのQ値が急激に悪化
 - ファイバーの表面積が小さすぎる



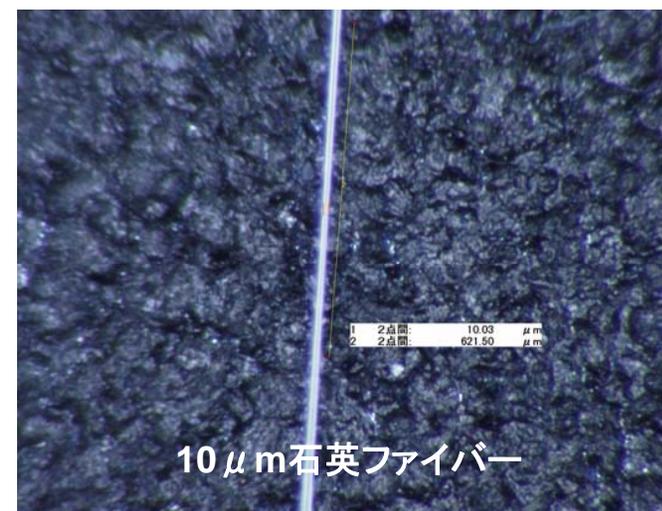
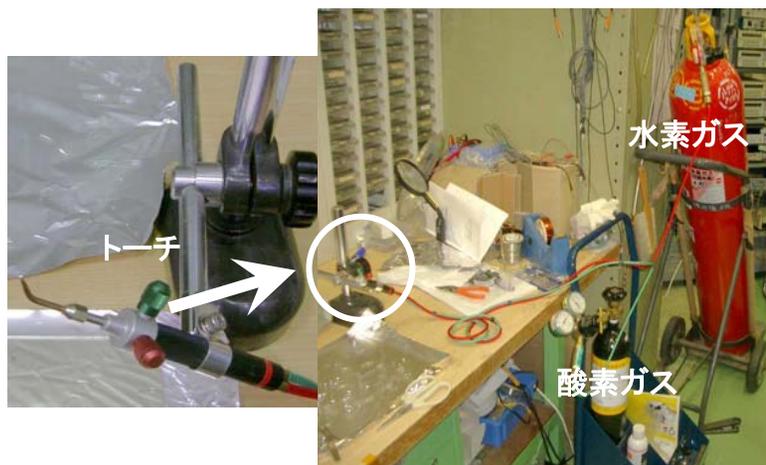
23mg石英鏡による振り子の組立 II

■ 10 μm 石英ファイバーの製作

» 水素/酸素ガスバーナーを使用

» 10 μm 石英ファイバーの製作工程

1. 厚さ2 mm石英棒 → 厚さ 200 – 300 μm の石英ファイバー作成
2. 厚さ 200 – 300 μm → 厚さ 50 – 70 μm
3. 厚さ 50 – 70 μm → 厚さ 10 – 20 μm
4. 微調しながら、10 \pm 3 μm の石英ファイバー作成

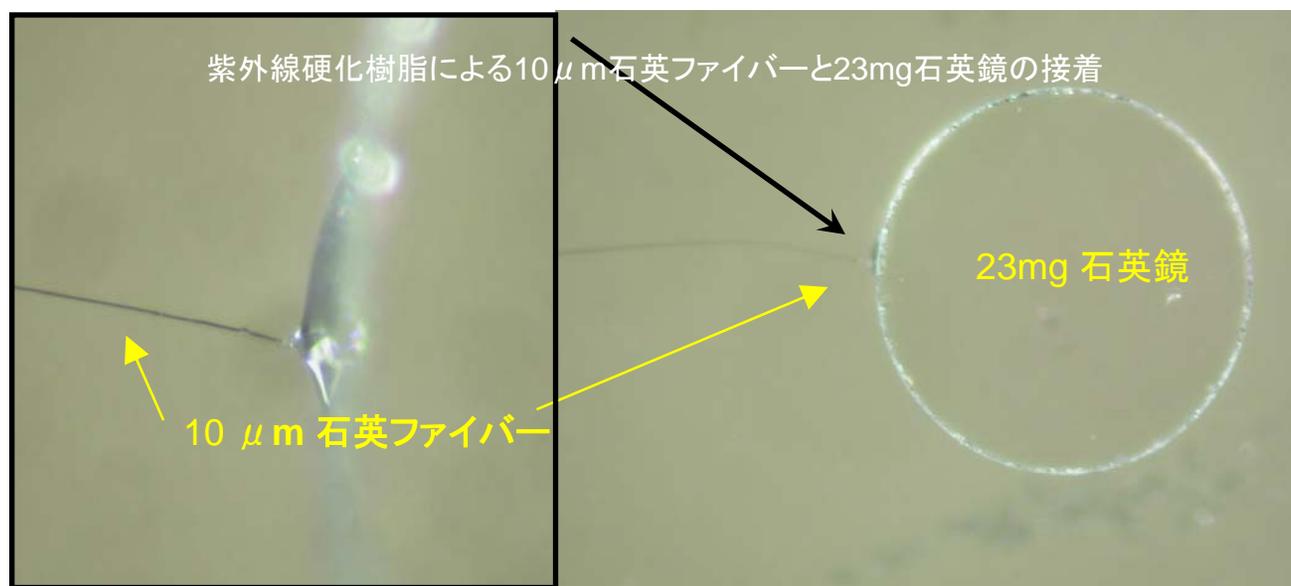


23mg石英鏡による振り子の組立 Ⅲ

■ 10 μ m石英ファイバーと23mg石英鏡の接着

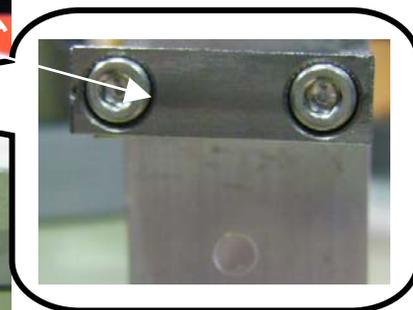
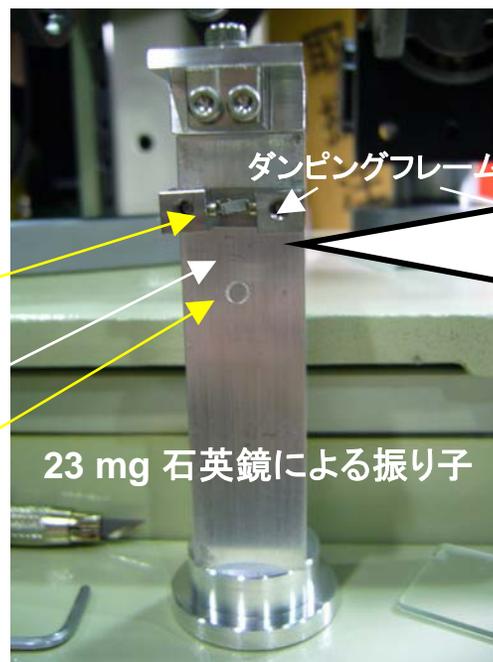
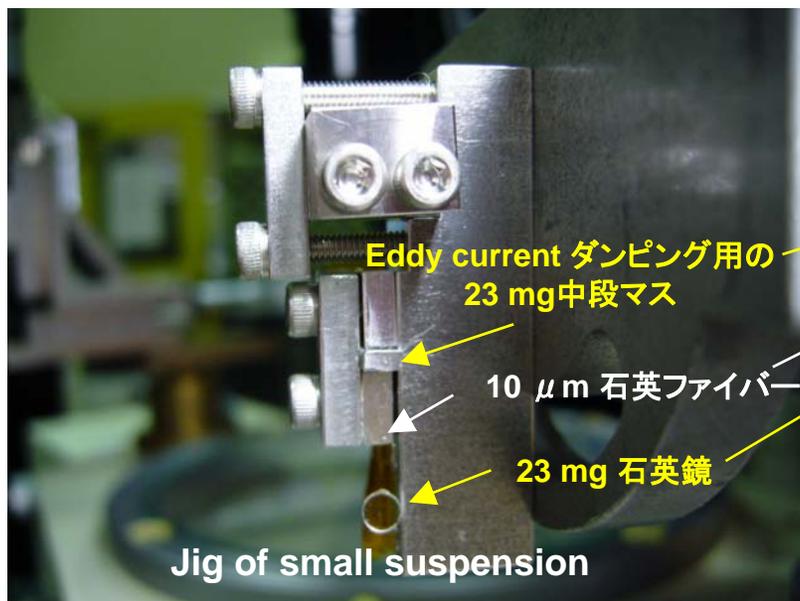
» 紫外線硬化樹脂を使用

- Vac-Seal等の2つの溶剤を混ぜるタイプの接着剤だと接着が困難
 - 接着面が非常に小さく、溶剤が混ざりきらないから
- 光学用の接着剤である (PBSの接着面に使用)



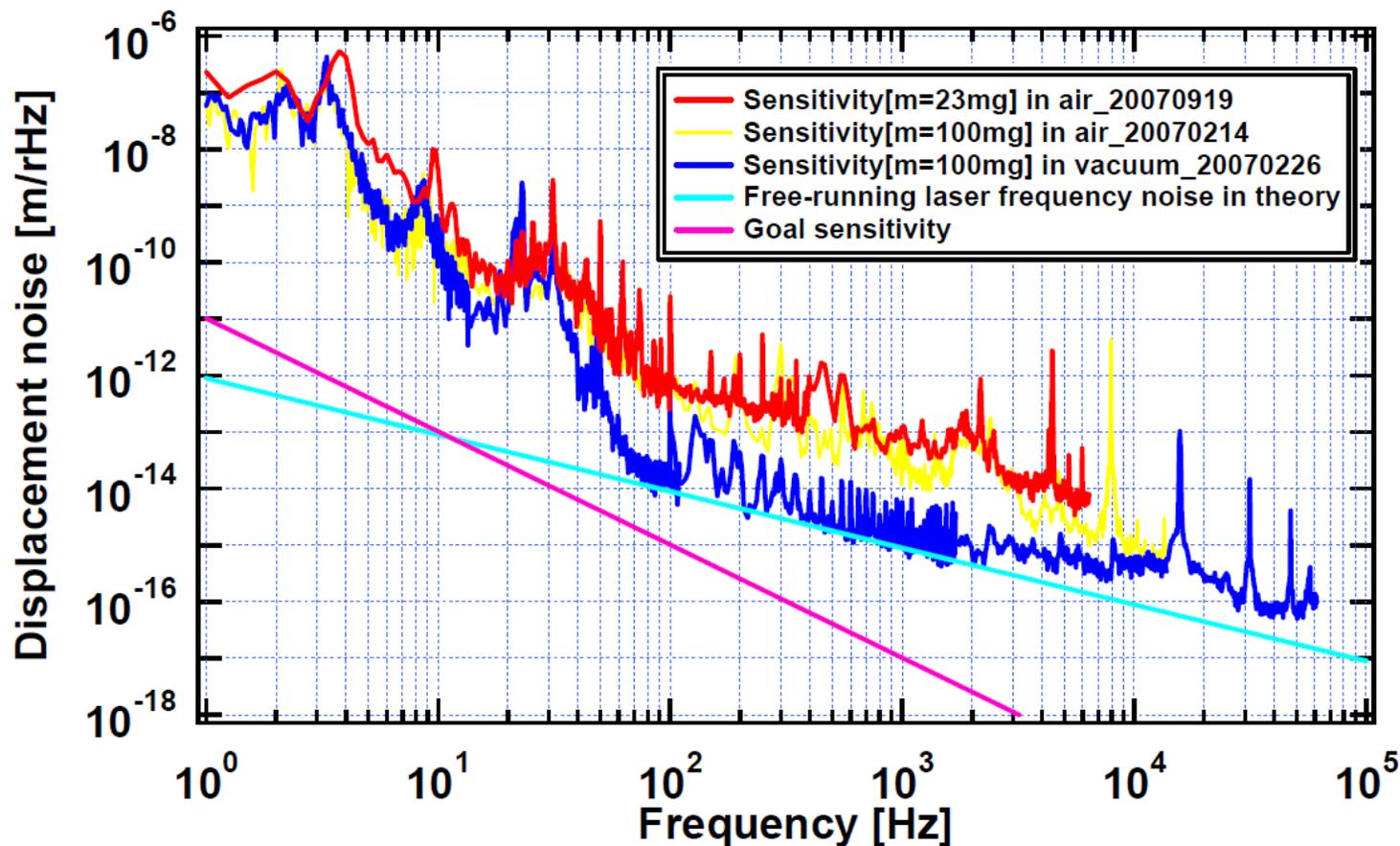
23mg石英鏡による振り子の組立 IV

■ 石英ファイバーで吊られた鏡による2段振り子の組立



現在の感度曲線

■ ファブリペロ共振器のロック



3. まとめと今後の課題

■ まとめ

- » 23mg石英鏡による振り子の組立
 - 厚さ10 μ m/長さ1cm石英ファイバーにより懸架
 - 接着面に紫外線硬化樹脂を使用
- » 23mg石英鏡による振り子を用いたファブリペロ共振器のロックに成功

■ 今後の課題

- » ファブリペロ・マイケルソン干渉計 with ホモダイン検波の組立
- » Finesse: 10000にするために共振器用の鏡を換える

The End