

修士課程の研究内容と 博士課程でやりたいこと

安東研中間報告2016

小森健太郎

実験の動機

熱浴から孤立した巨視的振動子

空間の最小
単位検証

未知のデコヒー
レンス検証

超精密
測定

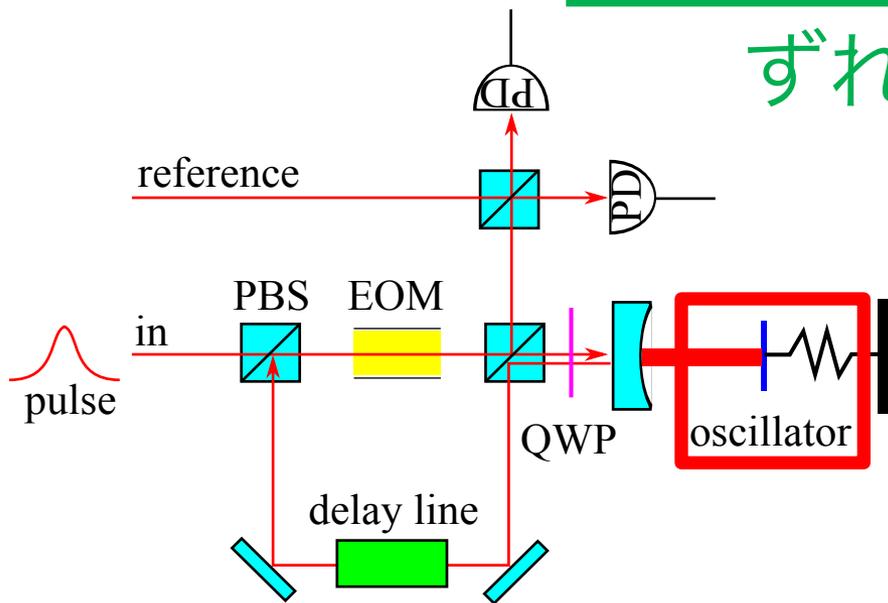
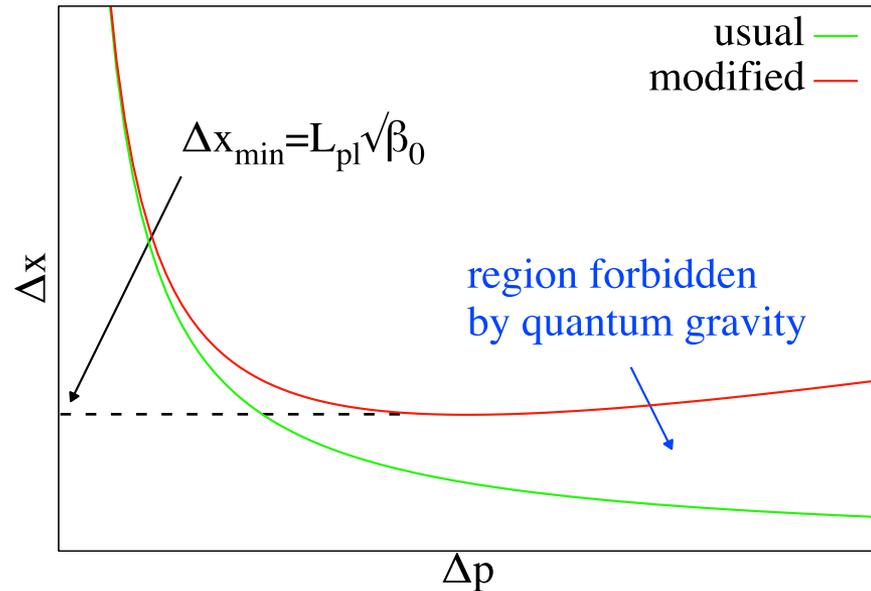
空間の最小単位検証

Δx に最小値が存在



$$[x, p] = i\hbar \left[1 + \beta_0 \left(\frac{p}{M_p c} \right)^2 \right]$$

ずれ



- 振動子にパルスを作用
- 振動子の交換関係を高精度で測定

Pikovski+ (2012)

未知のデコヒーレンス検証

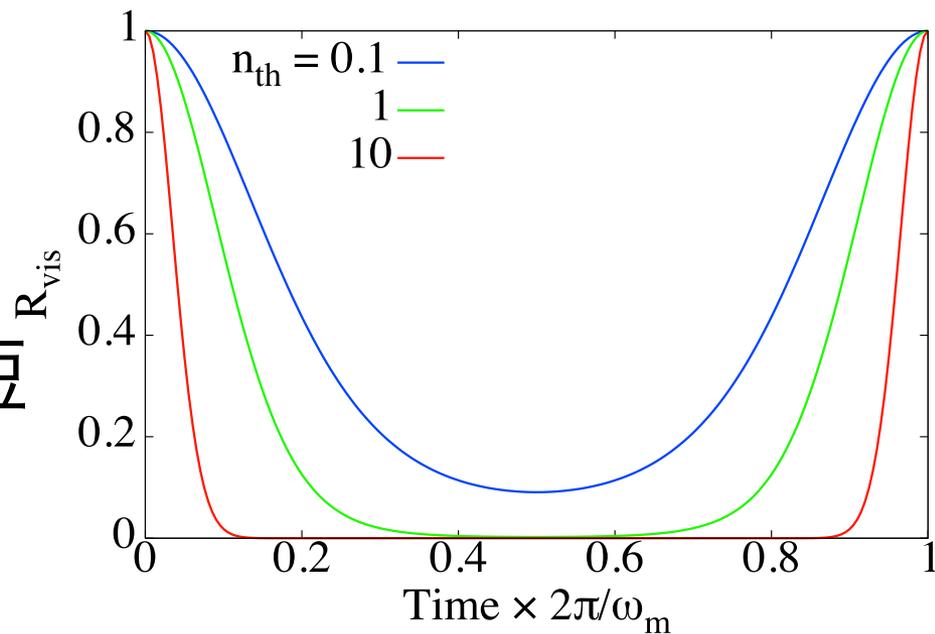
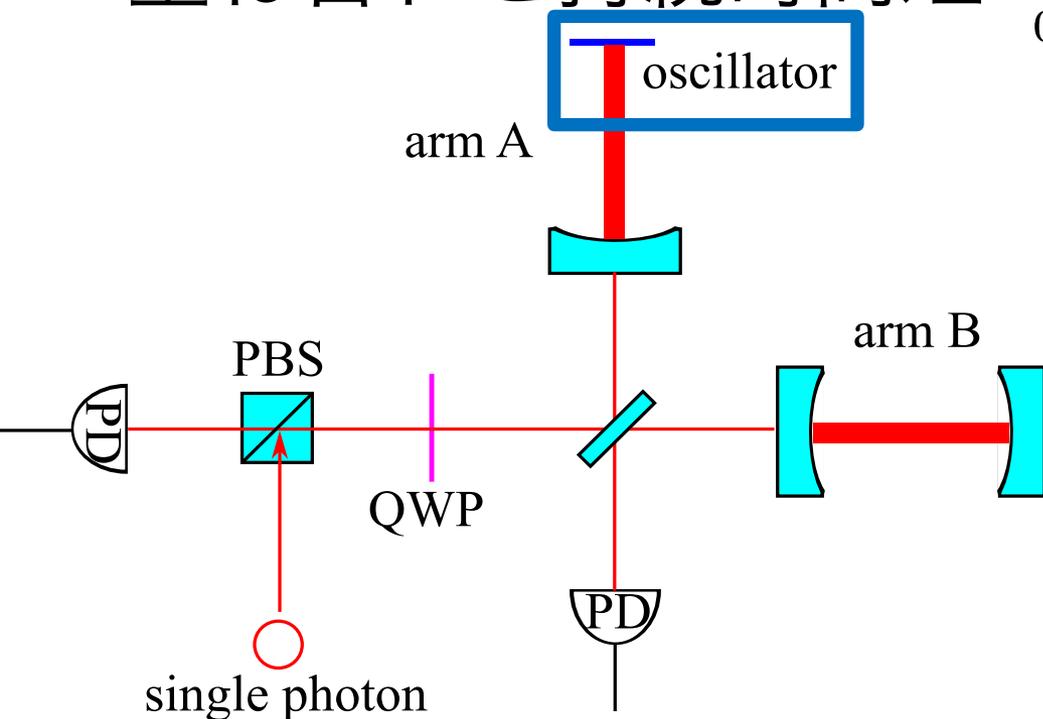
➤ 重力デコヒーレンス

$$\tau_G \propto m^{-3/2}$$

質量大

Diosi (1986)

↳ 重ね合わせ持続時間短



- 光子と振動モードの重ね合わせ作成
- 光の干渉の持続時間測定

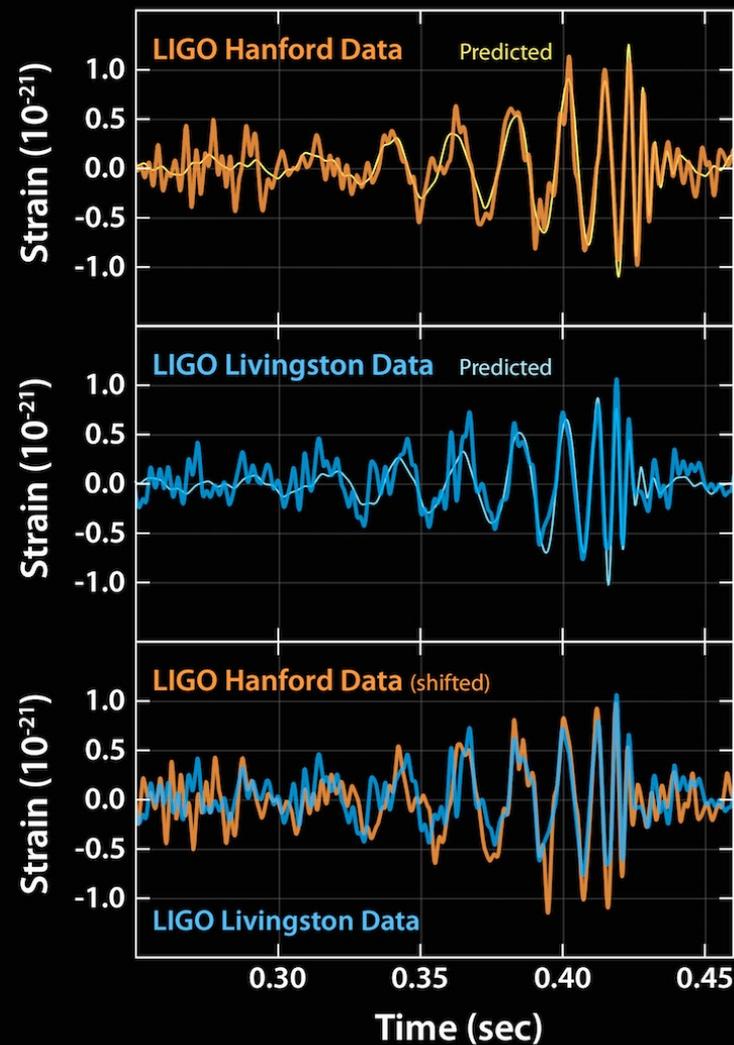
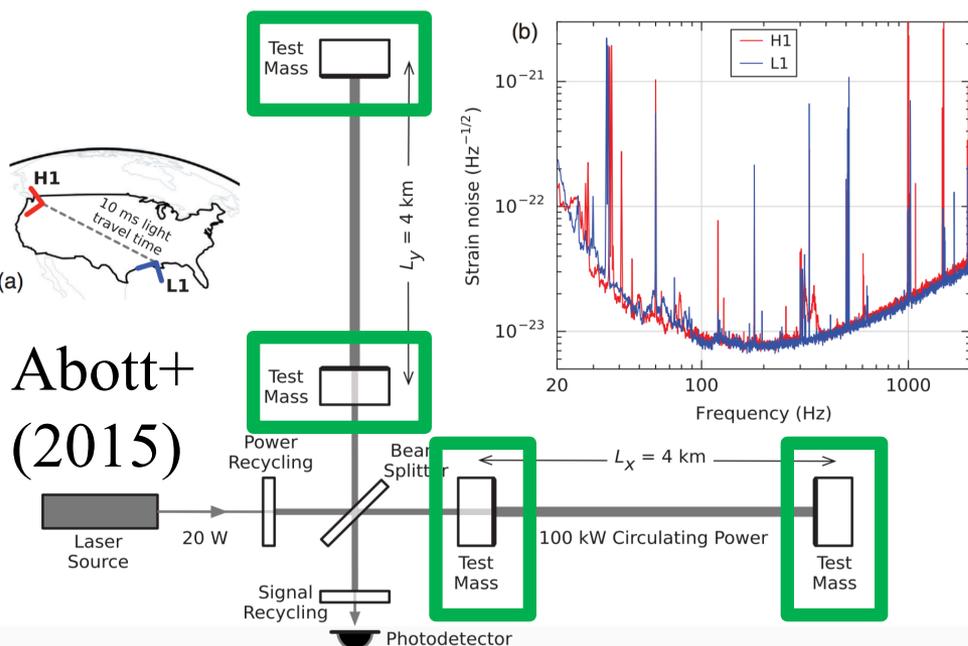
Marshall+ (2003)

超精密測定

➤ 重力波検出器など

極めて熱雑音の小さな振動子

↳ 位置や力の精密測定



実験の動機

熱浴から孤立した巨視的振動子

空間の最小
単位検証

未知のデコヒー
レンス検証

超精密
測定

- 基底状態まで冷却され
- 基底状態を保ったまま1回以上振動する

振動子を用意することを目指す

修士課程の研究内容

- *5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction*

N. Matsumoto, K. Komori *et al.*

Phys. Rev. A **92**, 033825

arxiv : 1312.5031

submitted on 2015/1/15, published on 2015/9/15

- *Reduction of thermal decoherence by optical trapping*

N. Matsumoto, K. Komori *et al.*

submitted on 2016/3/23 to Phys. Rev. Lett.

arxiv : 1603.05364

修士課程の研究内容

- *5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction*

N. Matsumoto, K. Komori *et al.*

Phys. Rev. A **92**, 033825

arxiv : 1312.5031

submitted on 2015/1/15, published on 2015/9/15

輻射圧揺らぎ測定

- 基底状態まで冷却され
- 基底状態を保ったまま1回以上振動する

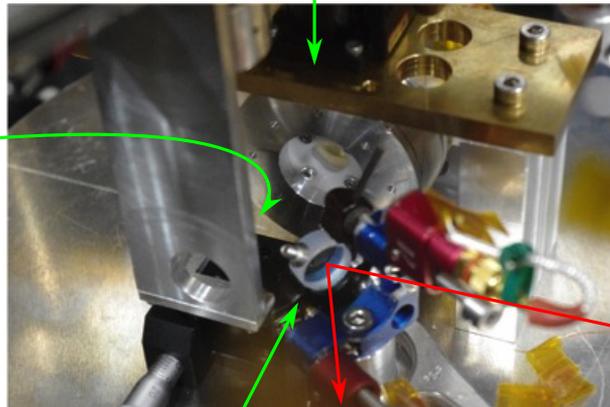
必要条件：量子輻射圧揺らぎ > 振り子の熱雑音

回転方向に安定な三角共振器で



5 mg pendulum

controlled mirror
with coil-magnet actuators



fixed mirror (half inch)

超細線で懸架
(熱雑音小)

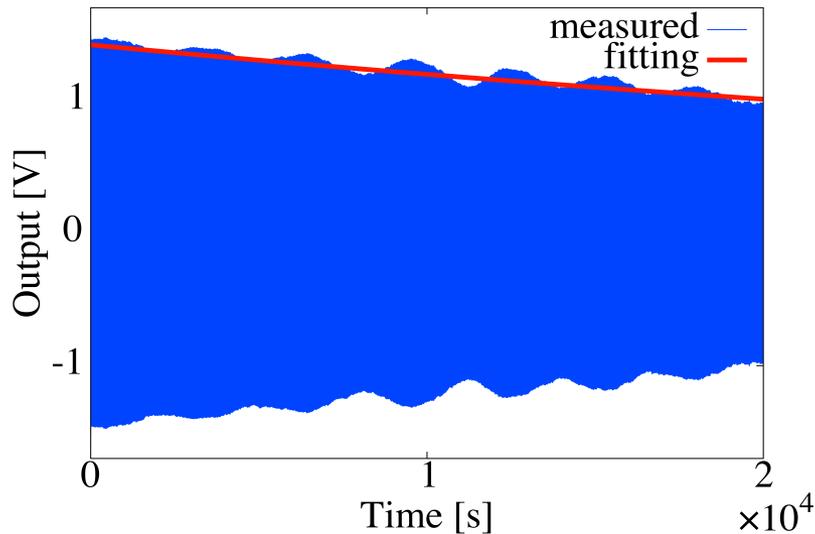
⇕ 両立

高共振器内光量
(輻射圧大)

測定結果と結論

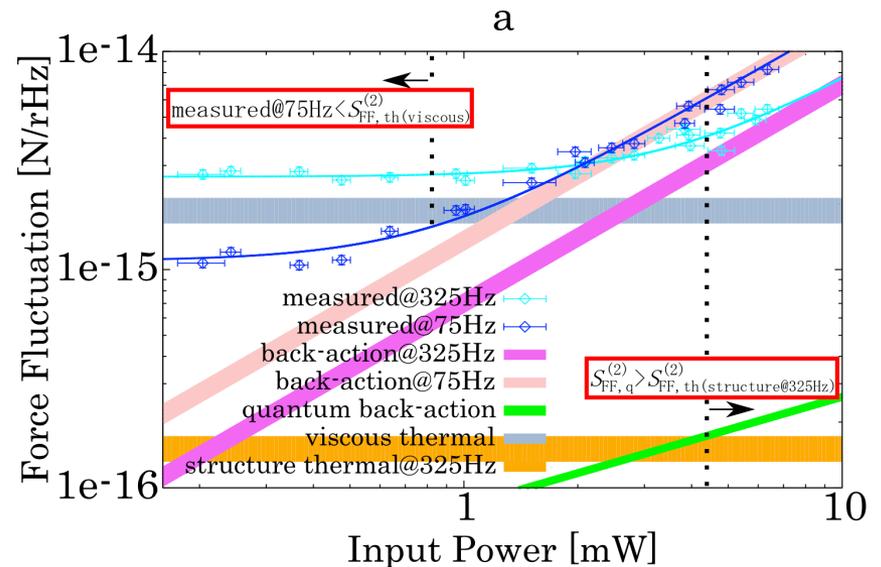
➤ 振り子のQ値

$$Q_m = (3.2 \pm 1.0) \times 10^5$$



➤ 最大共振器内光量

$$P_{circ} = 4.1 \text{ W}$$



325 Hzで量子輻射圧揺らぎと振り子の熱雑音のSN比 1.4 ± 0.2 を達成

修士課程の研究内容

➤ *Reduction of thermal decoherence by optical trapping*

N. Matsumoto, K. Komori *et al.*

submitted on 2016/3/23 to Phys. Rev. Lett.

arxiv : 1603.05364

遠隔光冷却とデコヒーレンス低減

- ▶ 基底状態まで冷却され
- ▶ 基底状態を保ったまま1回以上振動する

遠隔光冷却



mgスケールの鏡を
レーザー冷却する
手法



修論：
巨視的振動子の遠隔光冷却

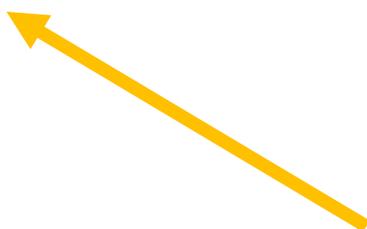
デコヒーレンス低減



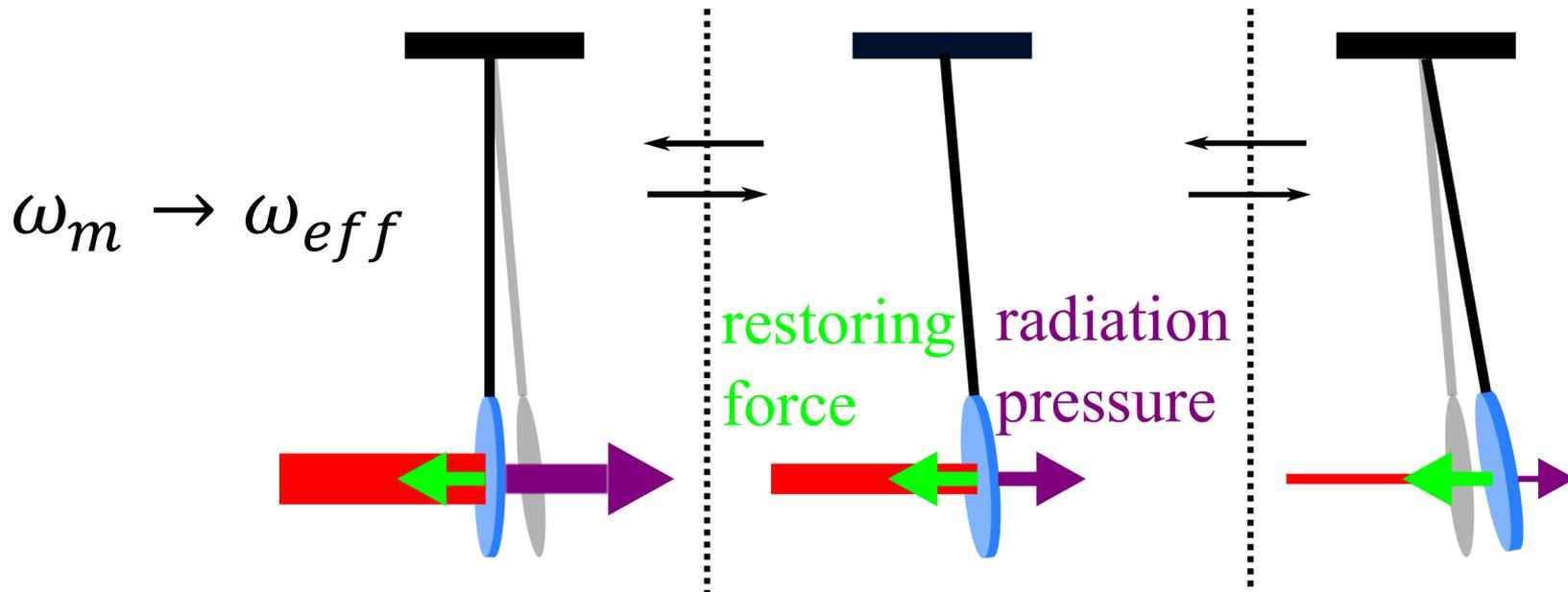
初のデコヒーレンス
率実測



光ばね



光ばね



輻射圧と復元力が釣り合う点で生じる新たなばね

- $2.135 \pm 0.001 \text{ Hz} \rightarrow 1.059 \pm 0.001 \text{ kHz}$ まで共振周波数を固くすることに成功

遠隔光冷却

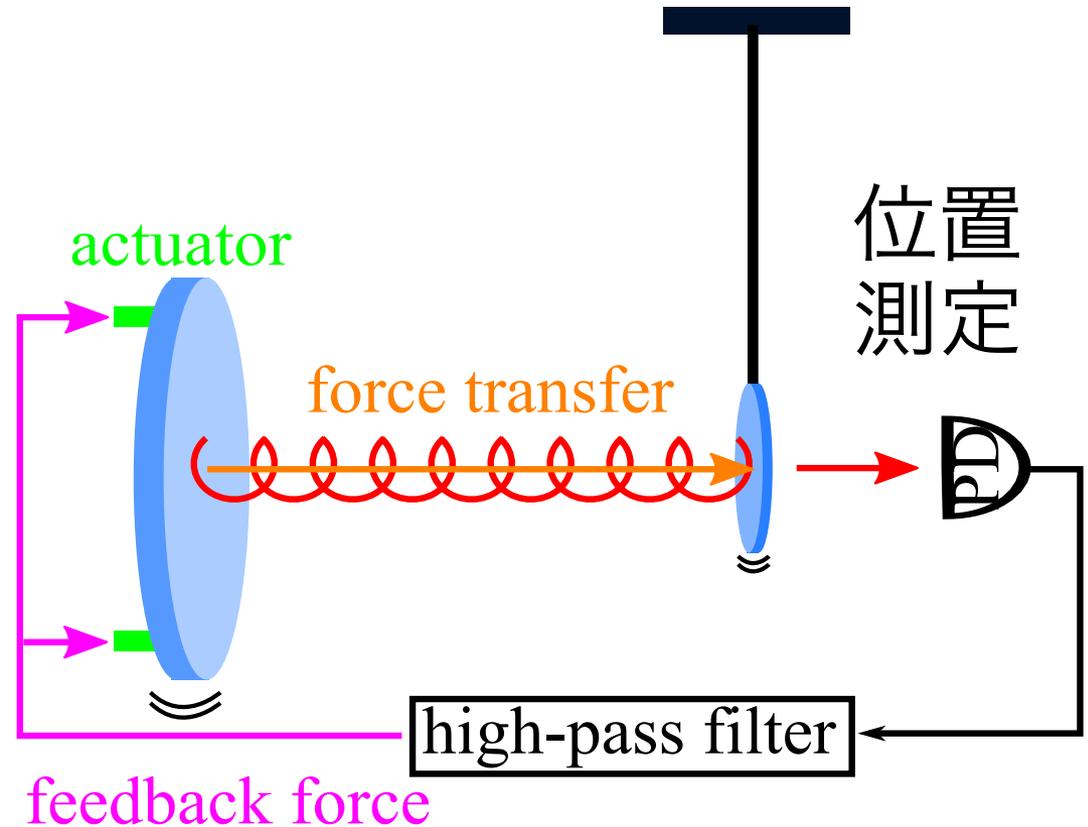
光ばねで冷却対象
を束縛



冷却対象でない鏡
にアクチュエータ
装着(mg鏡への装
着は困難)



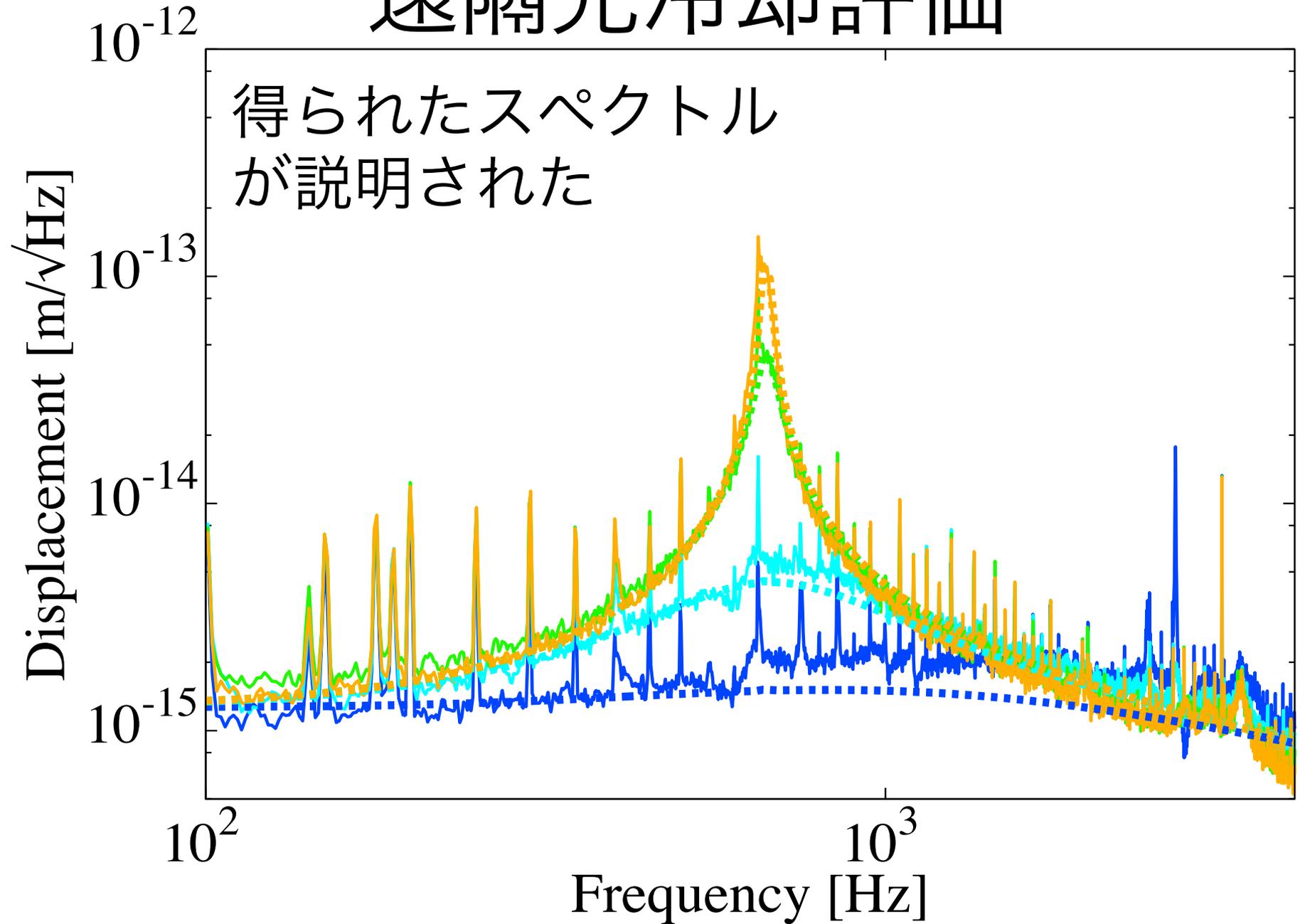
フィードバック力が
光ばねを介して伝達



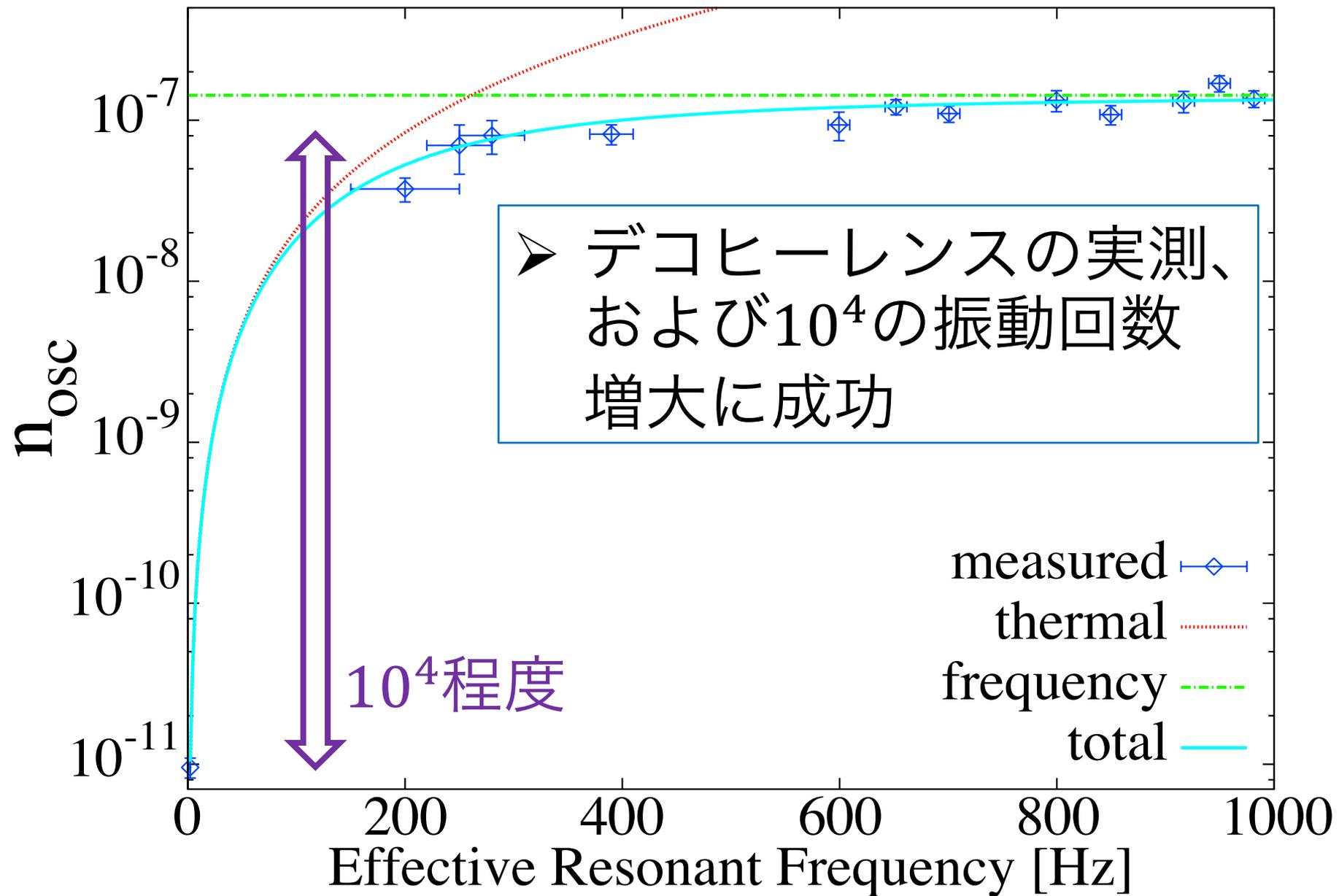
➤ 実効温度15 mKまで
冷却することに成功

遠隔光冷却評価

得られたスペクトル
が説明された



n_{osc} 共振周波数依存性評価



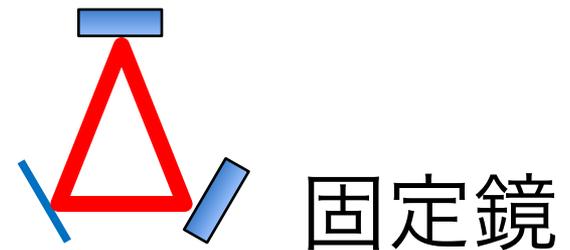
個人的な研究成果3つ

- ある程度の入射光量とセンタリングにより、フィードバックなしでのロックが簡単に実現、三角共振器の構成を変更せずに済んだ。

可動鏡(共振器長制御)



可動鏡(冷却)



個人的な研究成果3つ

- モードマッチ率、detuneまで考慮された、誤差の非常に小さなキャリブレーション係数の発見。

$$\sqrt{S_v(\omega)} = \sqrt{S_x(\omega)} \frac{\pi c m}{F \cos \beta} \left(1 - \frac{\kappa_{in}}{\kappa} \right) \underline{\omega_{eff}^2} R_{PD} \rho_{PD}$$

- 周波数雑音が光ばねを通して力の雑音に化けることへの気づき。得られたスペクトルをほぼ完全に説明した。

懸架鏡オプトメカの可能性

- 量子輻射圧揺らぎの測定(重力波検出器への応用)
- 重力デコヒーレンス検証(量子力学の検証)
 - ✓ 巨視的重ね合わせの実現、エンタングルメント持続時間測定
 - ✓ CSLモデル検証
- 空間の最小単位検証(プランクスケールの検証)

候補に挙げられた研究テーマ

- 量子輻射圧揺らぎの測定(重力波検出器への応用)
- 重力デコヒーレンス検証(量子力学の検証)
 - ✓ 巨視的重ね合わせの実現、エンタングルメント持続時間測定
 - ✓ CSLモデル検証
- 空間の最小単位検証(プランクスケールの検証)

CSLモデル検証

✓ 非線形シュレディンガー方程式

$$d|\psi\rangle = \left[\left(-i\hat{\mathcal{H}} - \frac{\alpha}{4} (\hat{x} - \langle \hat{x} \rangle)^2 \right) dt + \sqrt{\frac{\alpha}{2}} (\hat{x} - \langle \hat{x} \rangle) dW \right] |\psi\rangle$$

運動方程式は

$$\dot{p} = -m\omega_m^2 x - \gamma p + \underbrace{f_{th}(t)}_{\text{熱雑音}} + \underbrace{f_{CSL}(t)}_{\text{新たな運動量拡散}} \quad \text{と変化。}$$

力のスペクトルは

$$S(\omega) = 4k_B T_{th} \gamma_m m + D_{CSL} \quad \text{と変化。}$$

上昇温度 $\Delta T_{CSL} = \frac{D_{CSL}}{4k_B \gamma_m m}$ として観測される。

CSLモデル検証

$$\Delta T_{CSL} = \frac{D_{CSL}}{4k_B\gamma_m m} = \frac{4\pi\hbar^2}{k_B m_0^2} \frac{\rho}{d\gamma_m} \lambda_{CSL} \sigma_{CSL}^2$$

局在化スケール

局在化レート

⇒ 散逸 $\gamma_m = \frac{\omega_m}{Q_m}$ が小さいほど

振動子の厚さ d が薄いほど

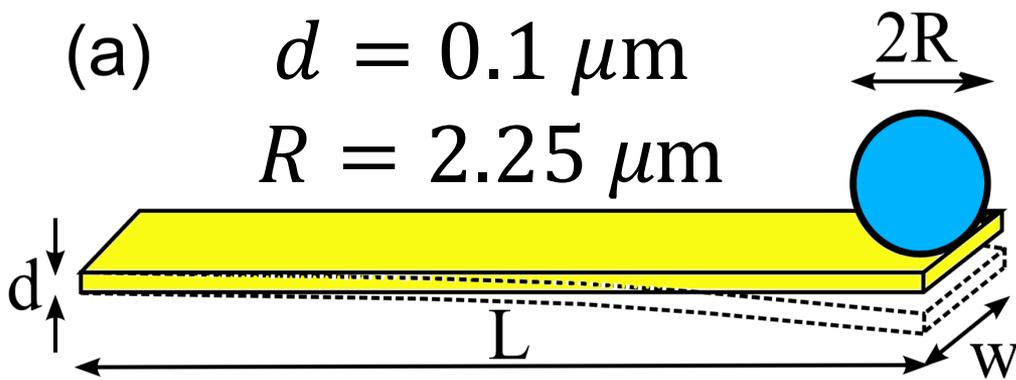
振動子の密度 ρ が高いほど

熱浴の温度 T_{th} が低いほど感度が高い。

先行研究

$$\Delta T_{CSL} = \frac{D_{CSL}}{4k_B\gamma_m m} = \frac{4\pi\hbar^2}{k_B m_0^2} \frac{\rho}{d\gamma_m} \lambda_{CSL} \sigma_{CSL}^2$$

(a) $d = 0.1 \mu\text{m}$
 $R = 2.25 \mu\text{m}$

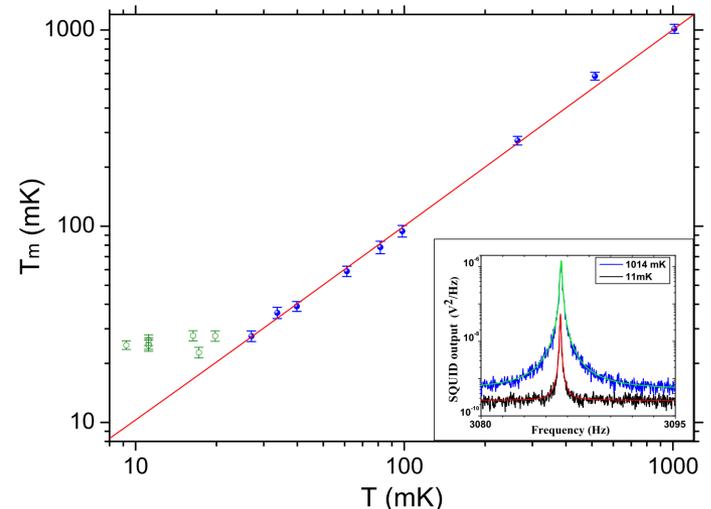


➤ 極薄(ラフな下限値が存在するスケール狙い)

➤ $T_{th} = 25 \text{ mK}$ の低温

➤ 熱浴の温度 T_{th} とスペクトルから見積もられる温度 T_m の比較

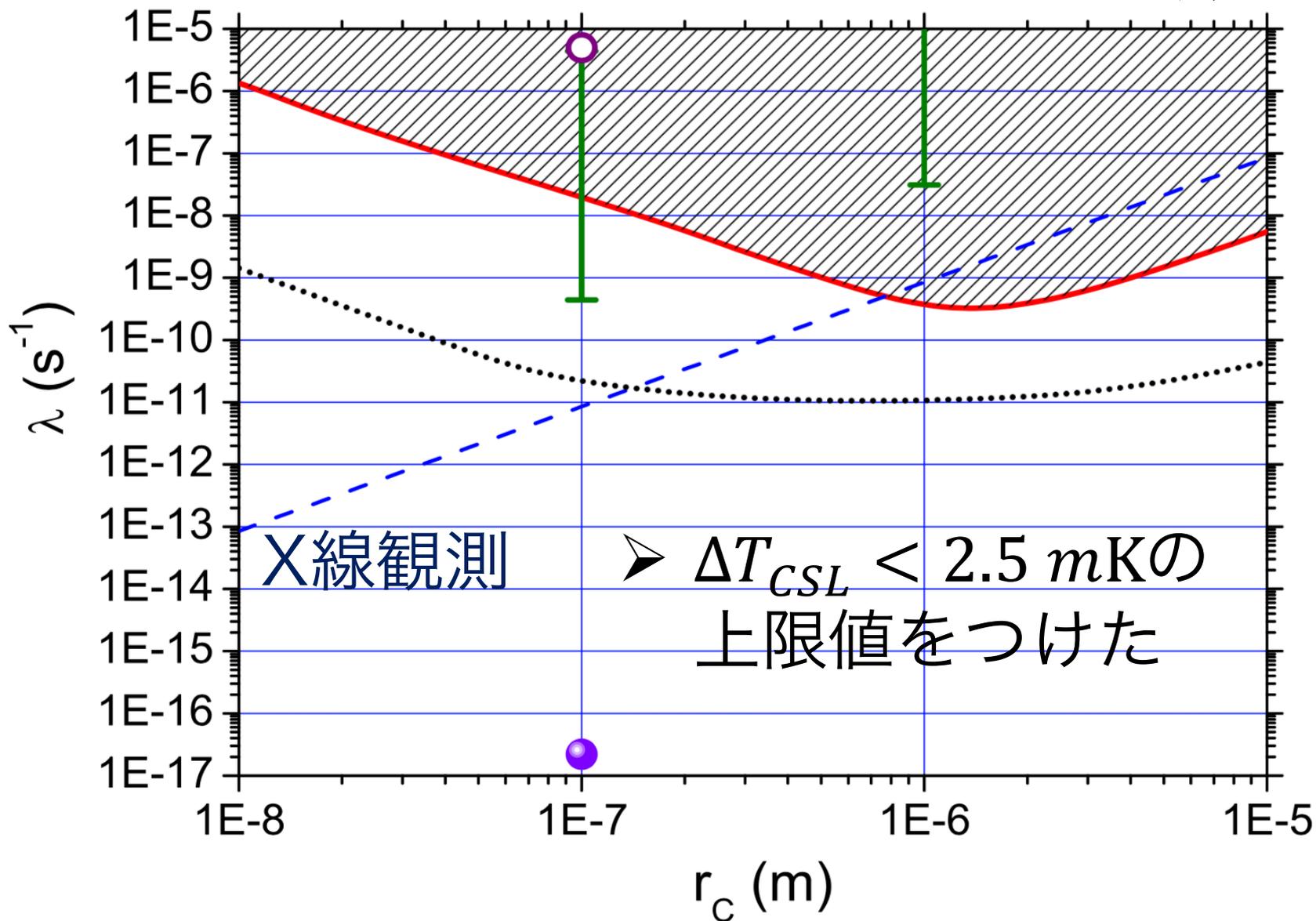
Vinante+
(2016)



Vinante+
(2016)

先行研究

95% C.L. での
排除領域



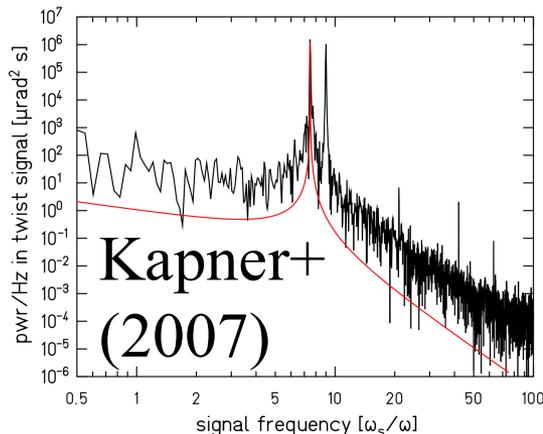
やりたい実験

$$\Delta T_{CSL} = \frac{D_{CSL}}{4k_B \gamma_m m}$$

⇒ 散逸 $\gamma_m = \frac{\omega_m}{Q_m}$ が小さいほど感度が高い。

⇒ 極めて散逸の小さいねじれ振り子を利用。

共振1Hz、Q値100万の振り子と
共振1mHz、Q値1000のねじれ振り子は等価



➤ ワシントンのねじれ振り子
共振2mHz、Q値3000
熱雑音リミットまであと4倍

回転運動の温度上昇

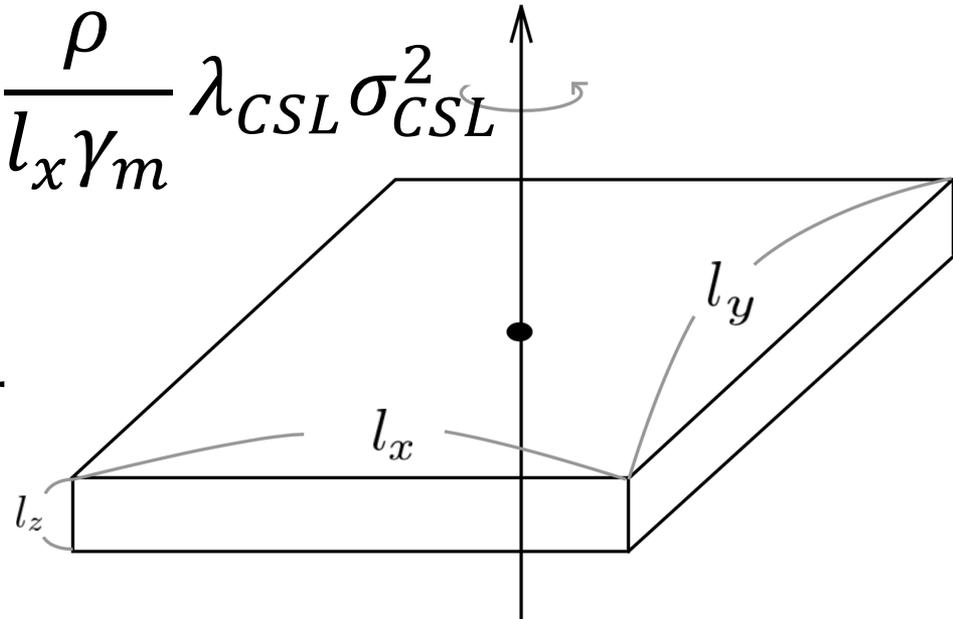
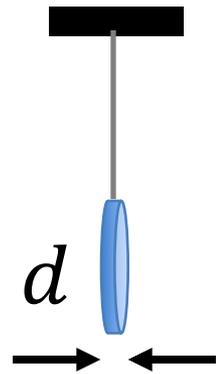
並進
$$\Delta T_{CSL} = \frac{4\pi\hbar^2}{k_B m_0^2} \frac{\rho}{d\gamma_m} \lambda_{CSL} \sigma_{CSL}^2$$

回転
$$\Delta T_{CSL} = \frac{\pi\hbar^2}{2k_B m_0^2} \frac{\rho}{\gamma_m} \frac{l_x^3 + l_y^3}{l_x^3 l_y + l_y^3 l_x} \lambda_{CSL} \sigma_{CSL}^2$$

$l_x \ll l_y$ のとき
$$\approx \frac{\pi\hbar^2}{2k_B m_0^2} \frac{\rho}{l_x \gamma_m} \lambda_{CSL} \sigma_{CSL}^2$$

- 依存性は全く同じ
- 8倍不利なのは要検討

calculated by Y. Ashida



回転運動の温度上昇

$$\Delta T_{CSL} \approx \frac{\pi \hbar^2}{2k_B m_0^2} \frac{\rho}{l_x \gamma_m} \lambda_{CSL} \sigma_{CSL}^2$$

散逸 $\gamma_m = \frac{\omega_m}{Q_m}$ が小さいほど \Rightarrow ねじれ振り子

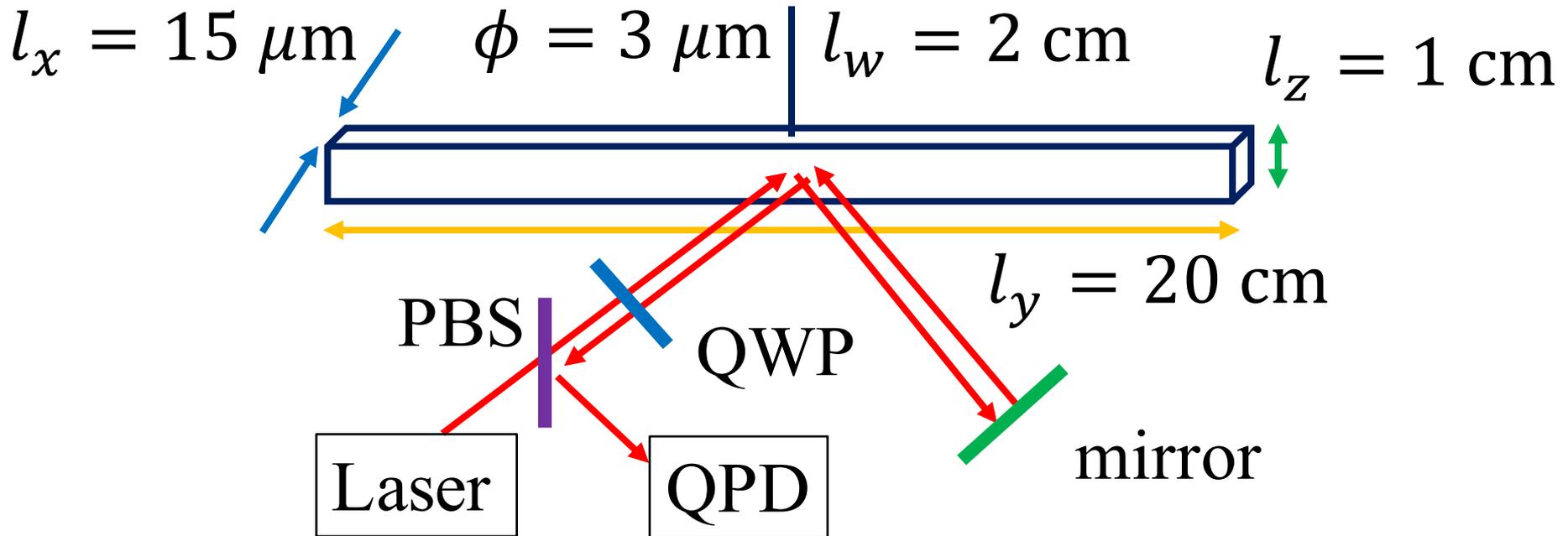
振動子の厚さ l_x が薄いほど \Rightarrow タングステン
振動子の密度 ρ が高いほど 薄膜

$$l_x = 15 \mu\text{m}$$

$$\rho = 19.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

タングステン / 箱					
品番	サイズ	備考	単位	価格	
W-463208	0.015x25x50mm 99.95%		1 枚	25,300 円	選択
タングステン特性資料 加工方法					
W-463228	0.025x50x50mm 99.95%		1 枚	9,900 円	選択
W-463221	0.025x100x100mm 99.95%		1 枚	25,400 円	選択
W-463248	0.035x50x50mm 99.95%		1 枚	5700 円	選択
W-463242	0.035x50x100mm 99.95%		1 枚	11,000 円	選択
W-463268	0.05x50x50mm 99.95%		1 枚	5,000 円	選択
W-463261	0.05x100x100mm 99.95%		1 枚	13,000 円	選択
W-463262	0.05x200x200mm 99.95%		1 枚	45,000 円	選択

簡単な実験計画



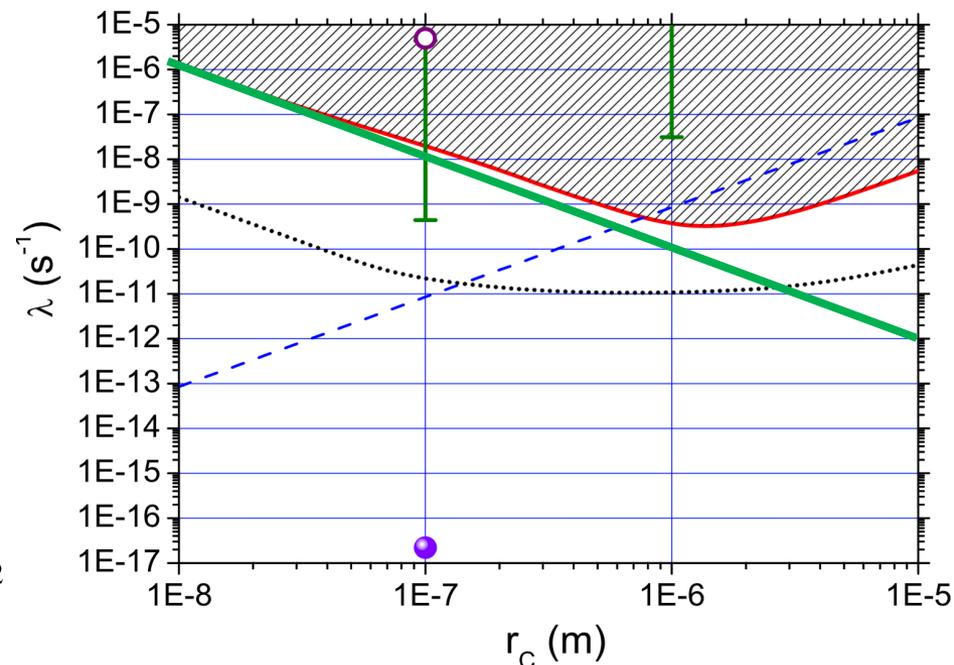
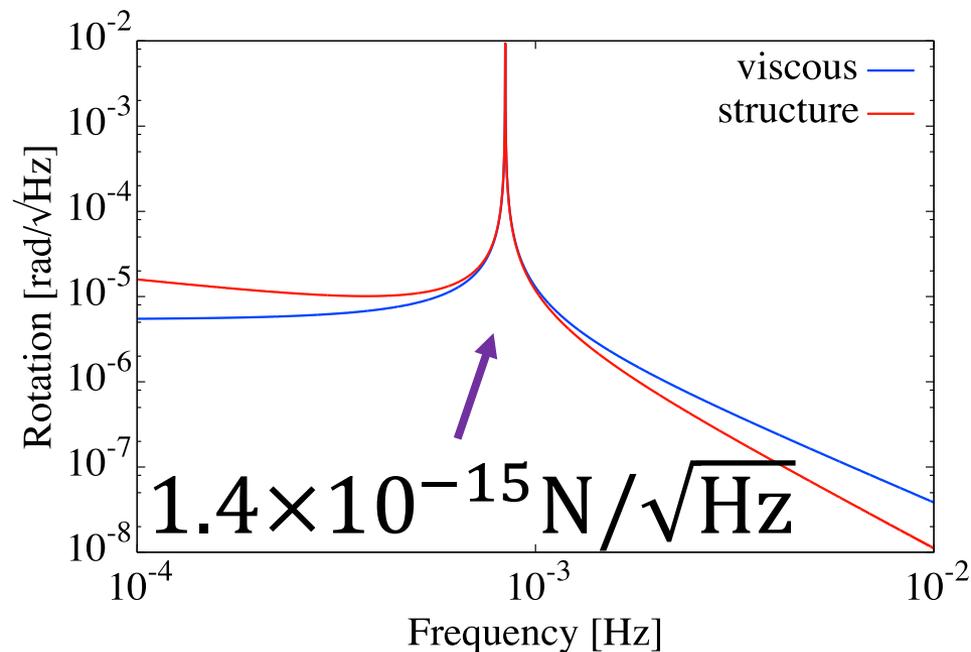
- タングステン薄膜をタングステン線で懸架
- 光でここで回転角を読み取る(並進カップル減)

質量 $m = 580 \text{ mg}$ 、

共振周波数 $f_m = 0.84 \text{ mHz}$

簡単な実験計画

- Q値は2000を仮定
- 熱雑音リミット到達、熱浴の温度が精度1割で測定 ($\Delta T_{CSL} < 30$ K) できれば上限値更新
- 冷やした分だけ精度は向上

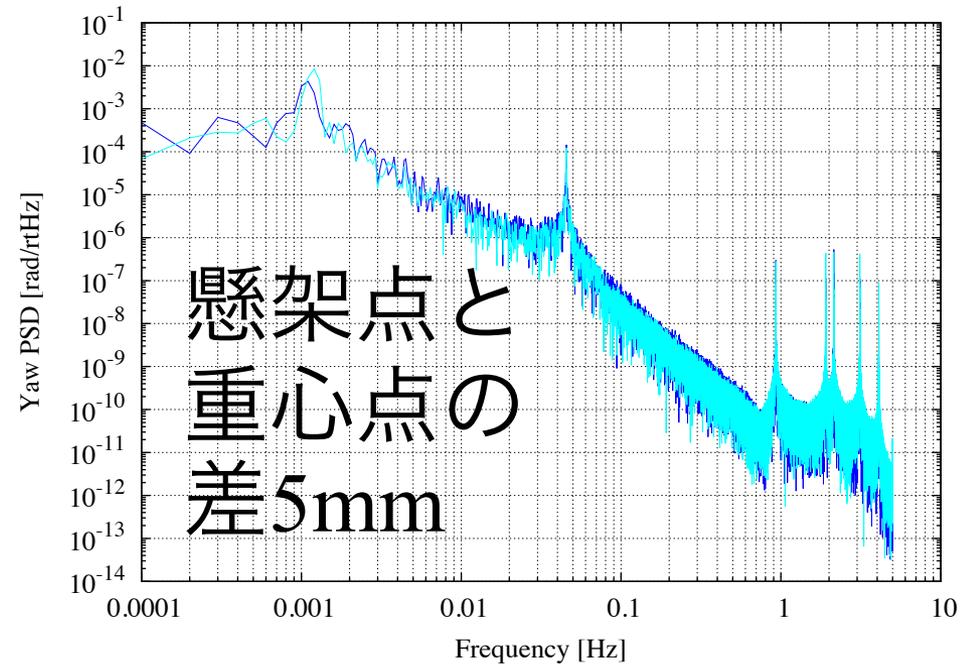


簡単な実験計画

- 炭素繊維(カーボンファイバー)の利用
- $\phi = 5 \mu\text{m}$ とタングステンより太いが、やわらかいため共振を低くできるかも
- Q値も高いかも

ただし…

- 低周波で難しそう
(主に地面振動)
- 何桁もの更新ができなさそう



calculated by T. Shimoda

候補に挙げられた研究テーマ

- 量子輻射圧揺らぎの測定(重力波検出器への応用)
- 重力デコヒーレンス検証(量子力学の検証)
 - ✓ 巨視的重ね合わせの実現、エンタングルメント持続時間測定
 - ✓ CSLモデル検証
- 空間の最小単位検証(プランクスケールの検証)

量子輻射圧揺らぎ測定

- スペクトルで観測した例はない
- 重力波検出器R&Dとしてのモチベーションが極めて高くなった
 - ✓ 予想以上に多いBBH合体の詳細を観測するには低周波での感度向上が肝
 - ✓ 近い将来輻射圧雑音で制限される
- テーブルトップでの輻射圧雑音の測定、低減の実証は必須

⇒ ねじれ振り子の利用

ねじれ振り子による測定

メリット (特に通常の振り子と比較して)

- 散逸が小さい
- structure dampingの恩恵を受けやすい
- 実効質量が、慣性モーメントに現れるファクターだけ小さくなり、SNが上がる
- 1台で同相雑音除去が可能

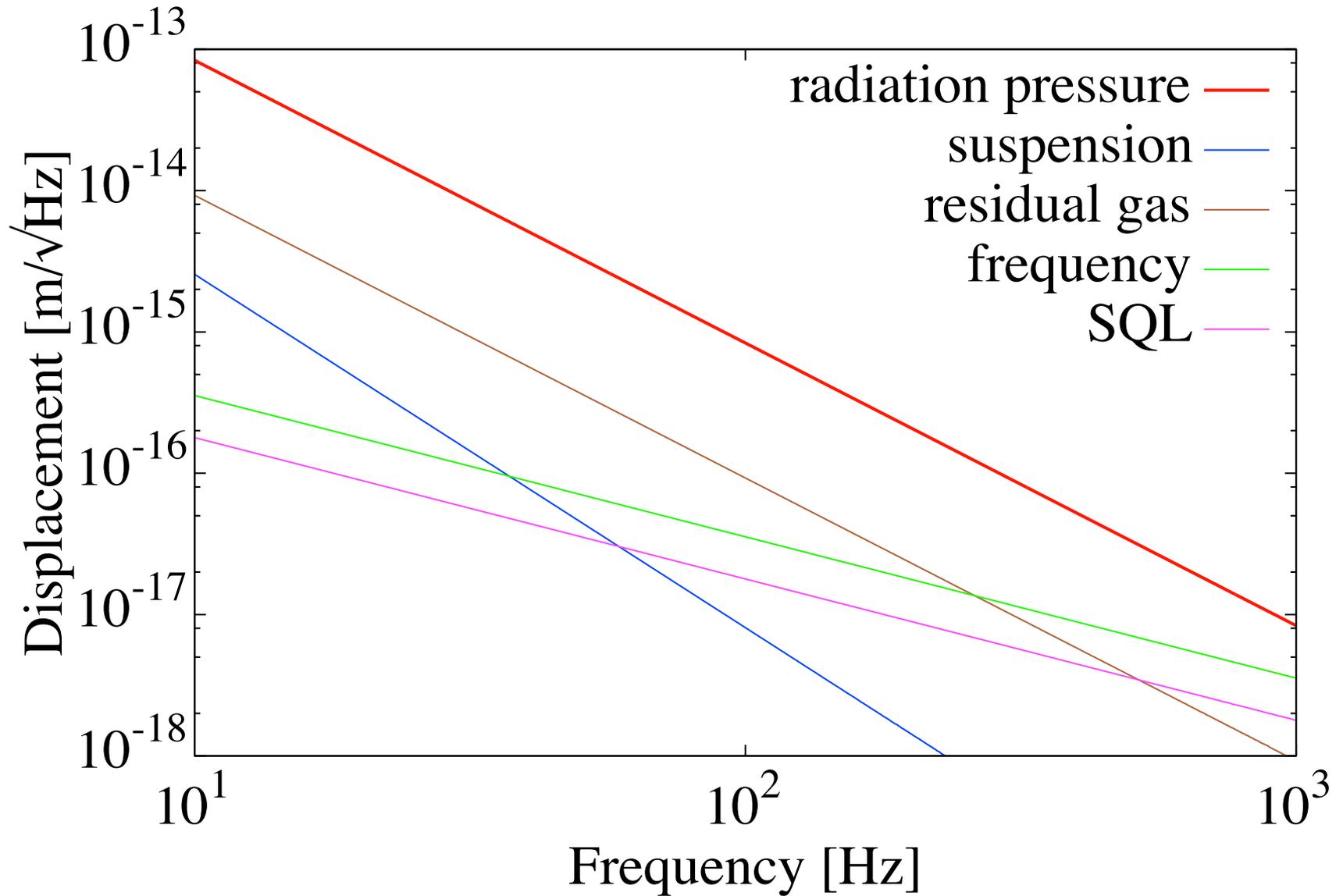


- ✓ ダンベル状のねじれ振り子が理想だが...
- ✓ 両腕で共振器を構成

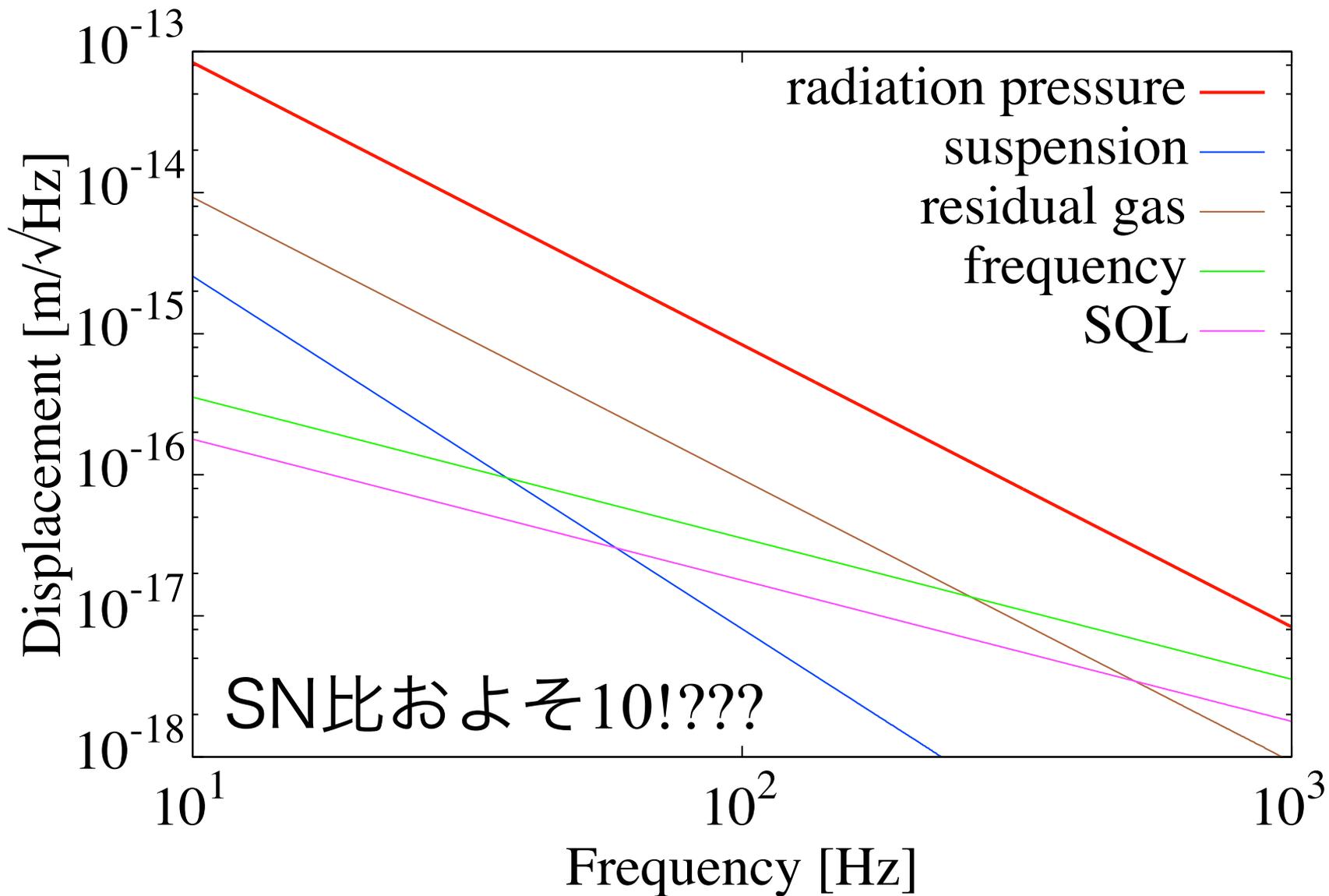
実験計画

- とりあえず、 $0.1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 10\text{cm}$ の棒(20mg)をテストマスとして使うことにする
- 懸架線は $\phi = 3\mu\text{m}$ 、長さ5cmのタングステン
- Q値2000、structure damping
- 気圧 10^{-5}Pa
- 入射光量10mW、フィネス3000、クリティカルカップリング
- 周波数雑音はデータシートより2桁落とす
- 強度雑音は $B_{rsnl} = 3$ 程度までなら簡単に落とせることがわかっている
- 同相雑音除去比10

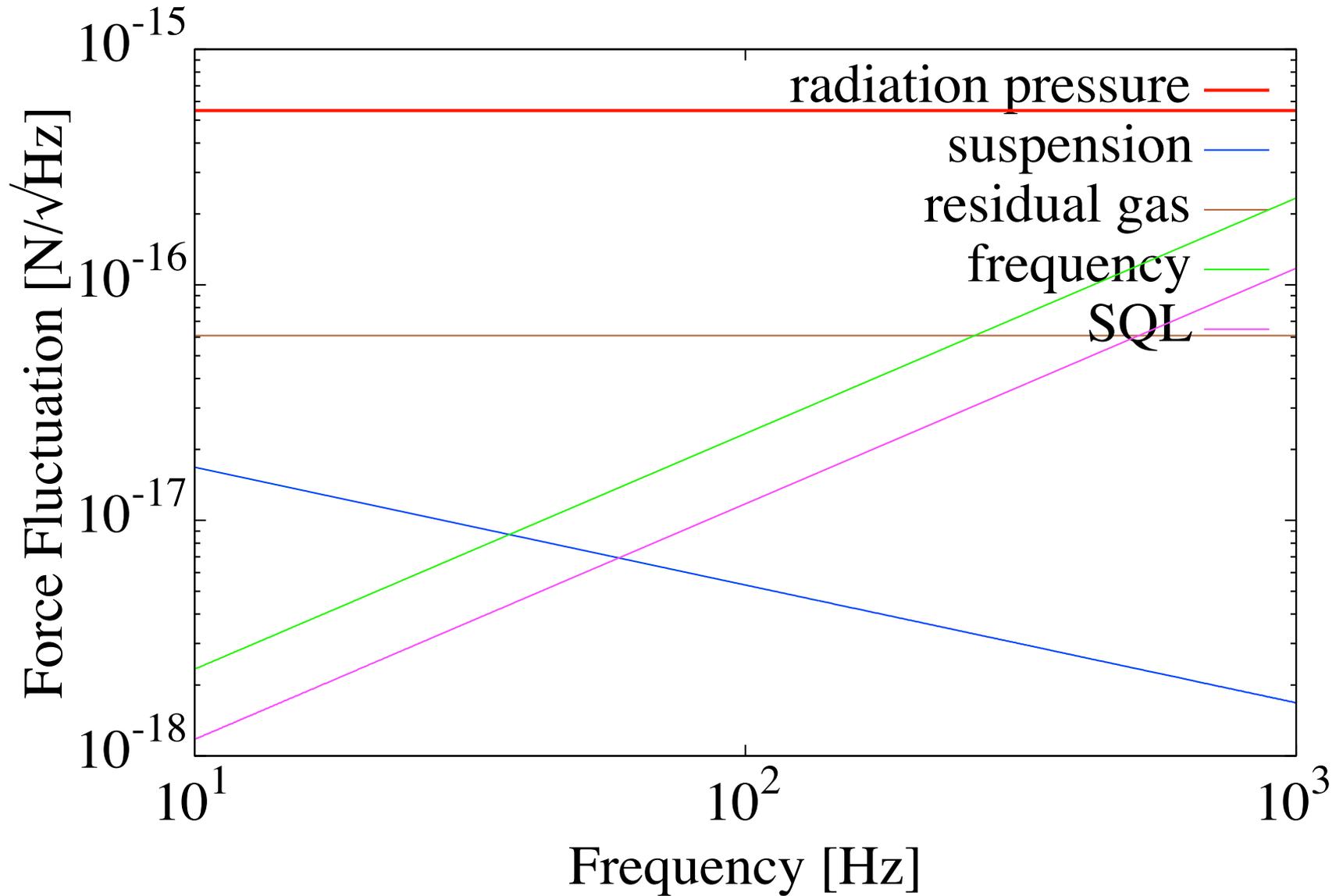
スペクトル比較



スペクトル比較



スペクトル比較



怪しいところ

- とりあえず、 $0.1\text{mm} \times 1\text{mm} \times 10\text{cm}$ の棒(20mg)をテストマスとして使うことにする
 - 懸架線は $\phi = 3\mu\text{m}$ 、長さ5cmのタングステン
 - Q値2000、**structure damping**
 - 気圧 10^{-5}Pa
 - 入射光量10mW、フィネス3000、クリティカルカップリング
 - 周波数雑音はデータシートより2桁落とす
 - 強度雑音は $B_{rsnl} = 3$ 程度までなら簡単に落とせることがわかっている
 - 同相雑音除去比10
- そもそもロックできる？

そもそもロックできるか

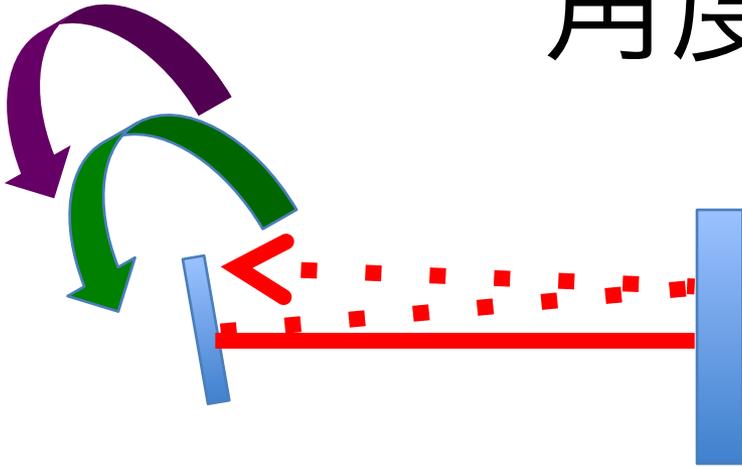
- 高精度で両腕の共振器内光量を調整する必要あり。調整機構をどうするか、ロックの手順は？
- ねじれ振り子+2台の共振器のオプトメカニクス系を考える必要あり
- 他の自由度(サイド、ロールなど)からのカップリングは大丈夫か？
- 棒の両端の鏡を曲率付き鏡にできれば、光学浮上の原理計算からサイド、ロールは固くできそう

まとめ

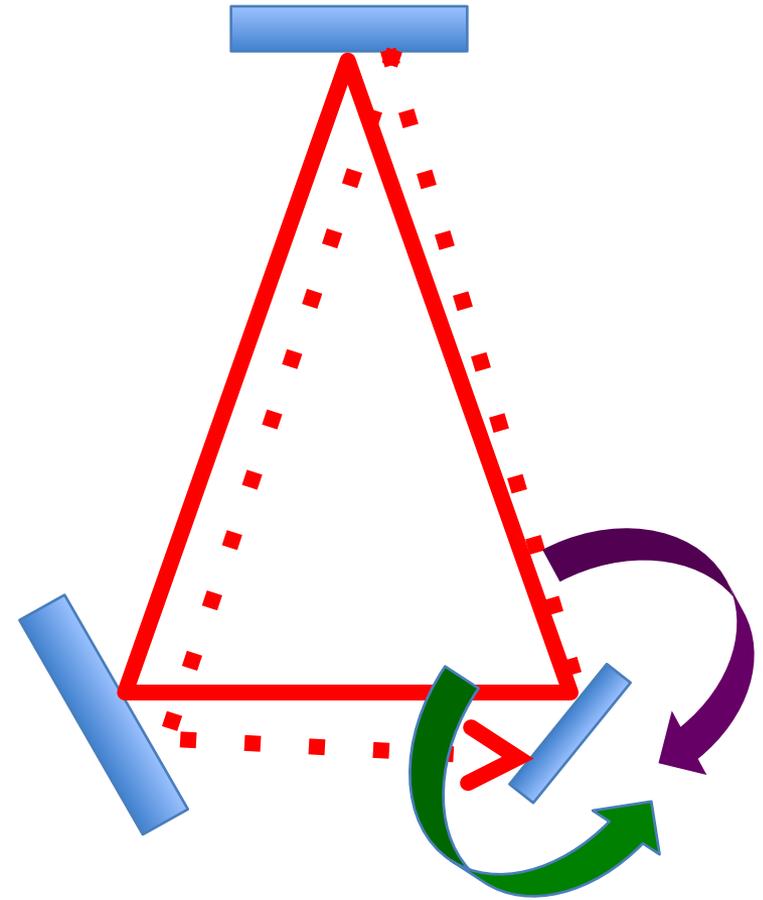
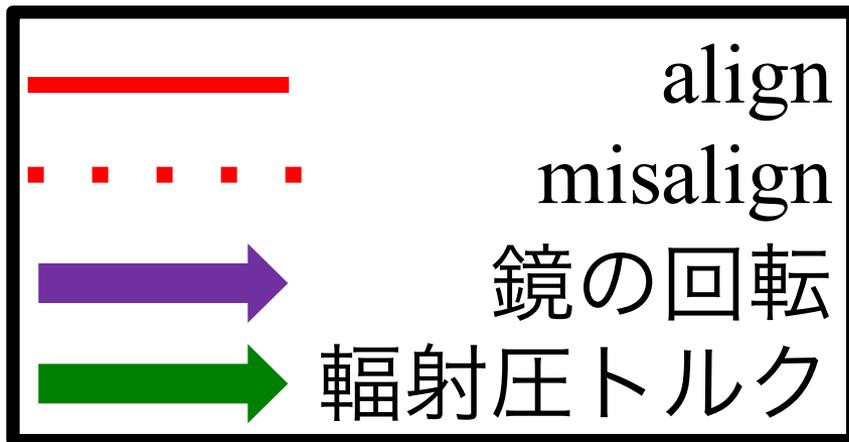
- 修士課程では、古典輻射圧測定、remote cooling、デコヒーレンス測定の実験に取り組んだ
- 懸架鏡オプトメカニクスの実験は、様々な基礎物理に迫る可能性を秘めている
- 博士課程では、CSLモデルの検証または初心に立ち返って量子輻射圧測定の実験をやりたい…?

補助スライド

角度安定性

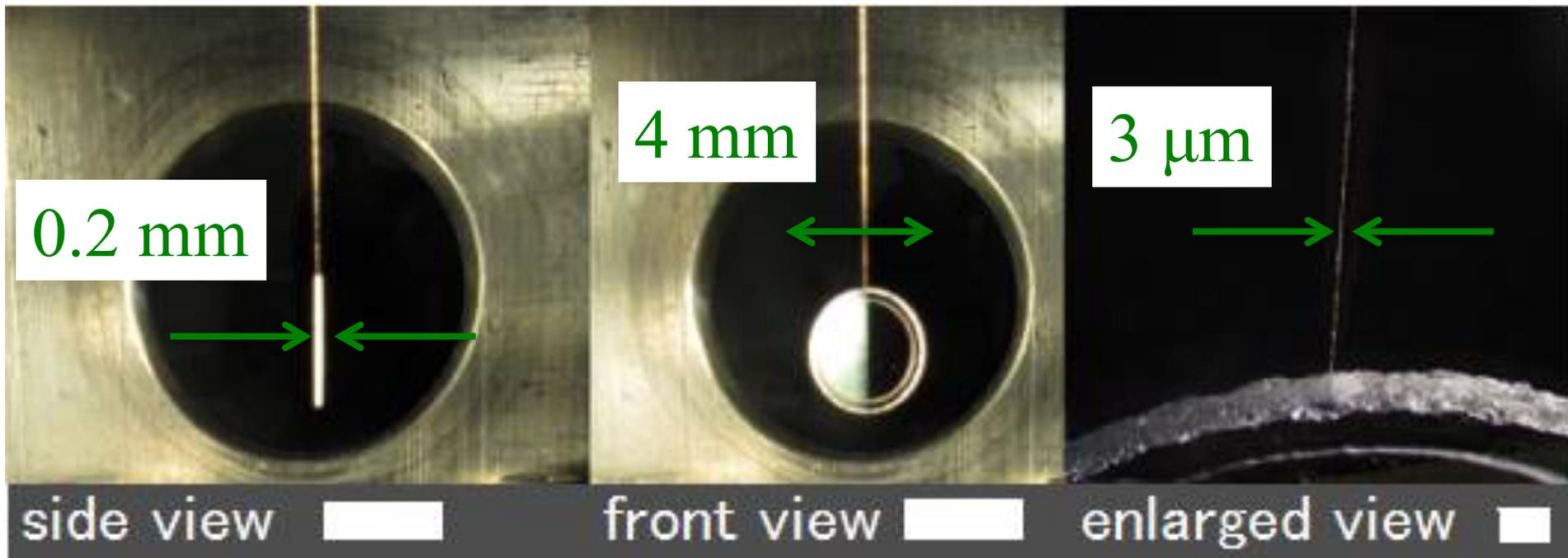


線形共振器：不安定



三角共振器：安定

冷却対象となる懸架鏡



- ワイヤー素材：タングステン
- ワイヤー長：5 cm
- 鏡の質量：5 mg

較正係数

- 測定されたエラー信号 [V] を変位量 [m] に較正する必要がある。

光ばね特性評価から

$$\sqrt{S_v(\omega)} = \sqrt{S_x(\omega)} \frac{\pi c m}{F \cos \beta} \left(1 - \frac{\kappa_{in}}{\kappa}\right) \omega_{eff}^2 R_{PD} \rho_{PD}$$

スペック値

反射光測定から スペクトルから

m : 懸架鏡質量

$R_{PD} \rho_{PD}$: PD効率

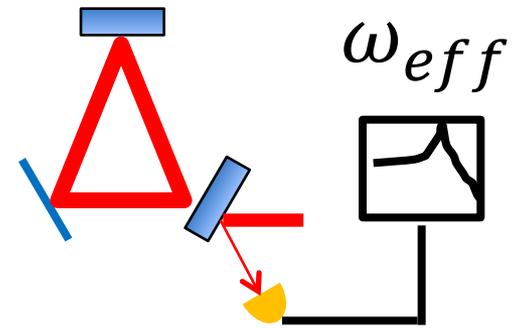
F : フィネス

κ_{in} : 入射鏡損失

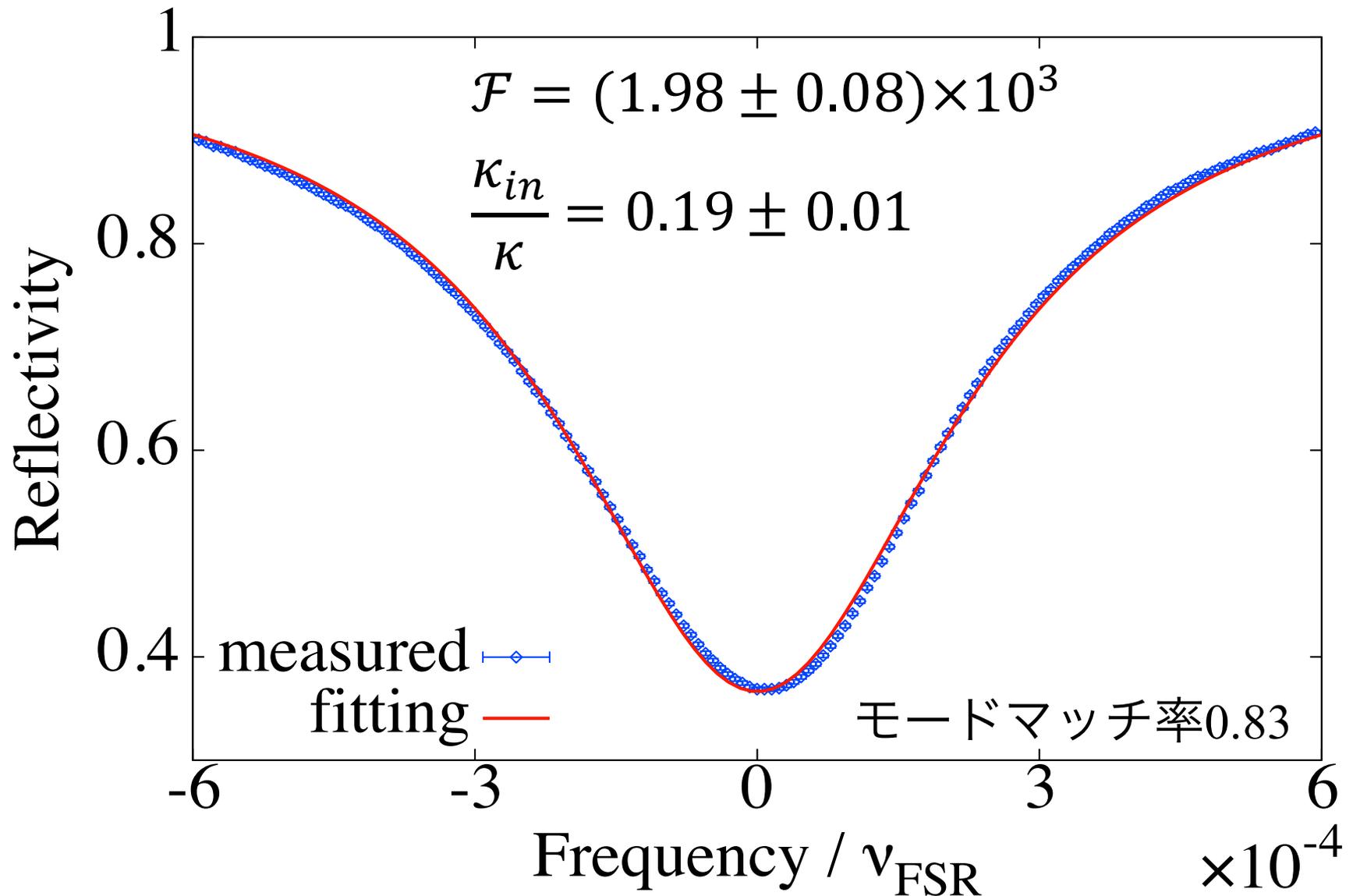
κ : 共振器線幅

ω_{eff} : 共振周波数

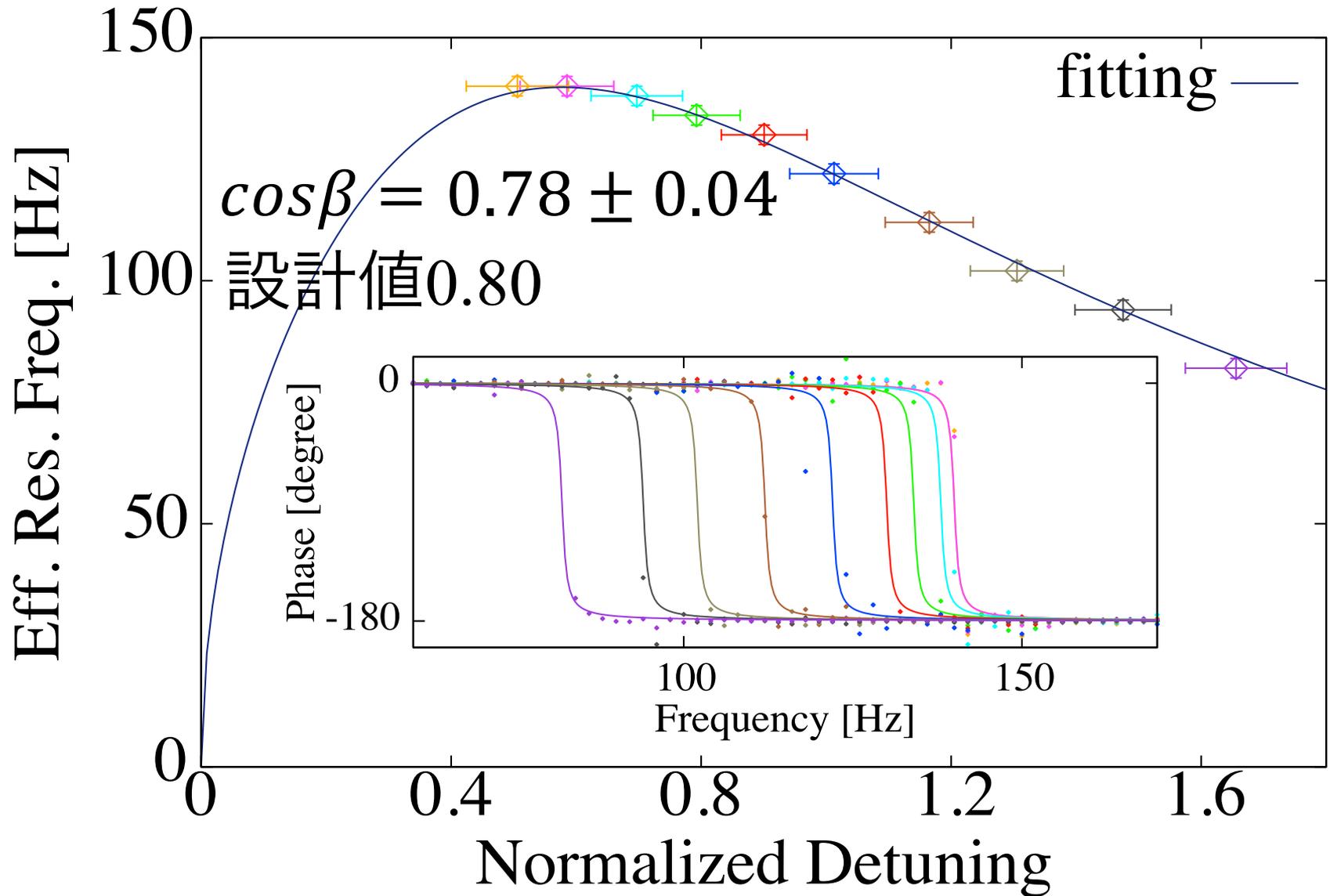
β : 懸架鏡反射角



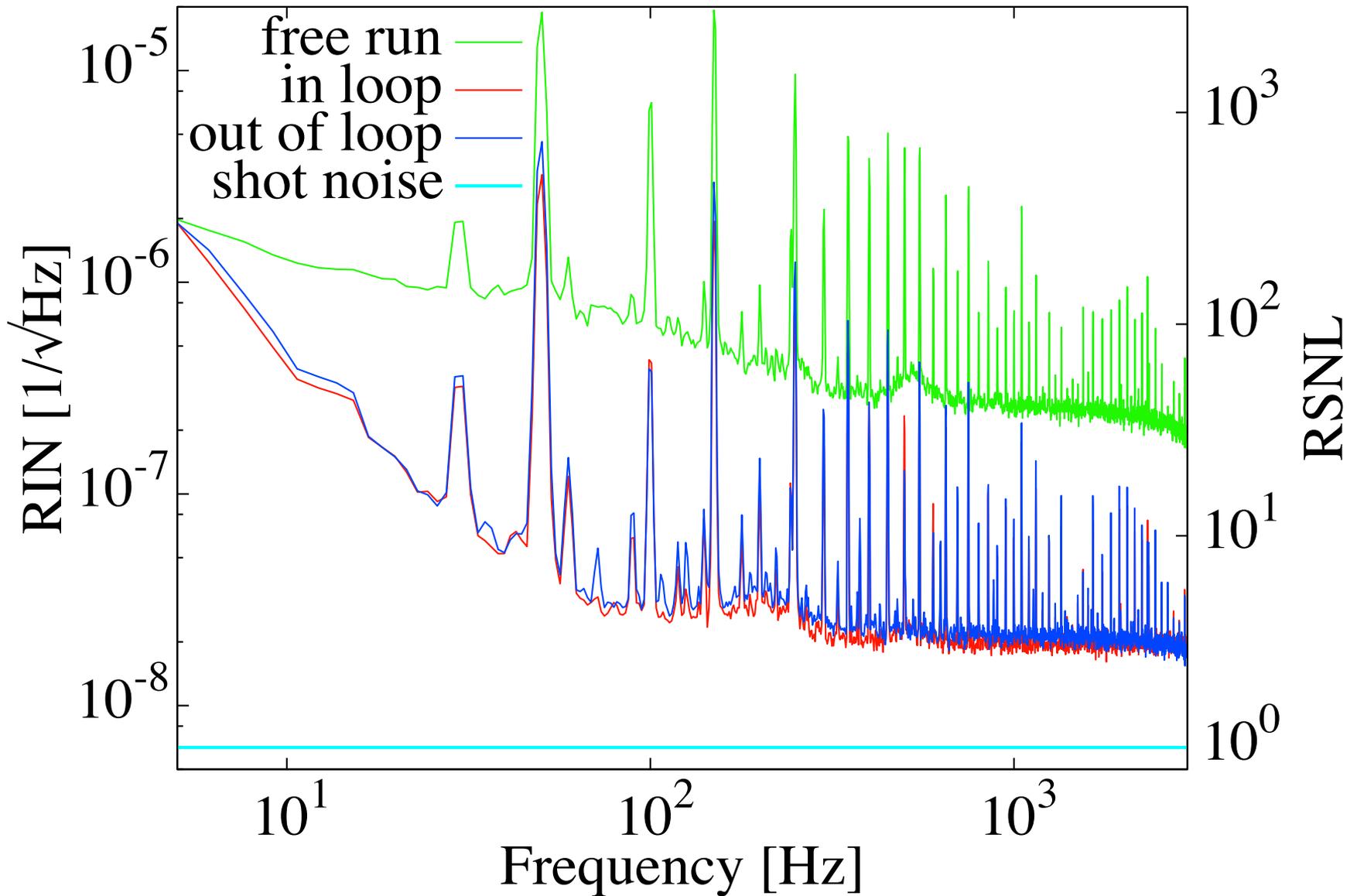
光学パラメータ測定



光ばね特性評価



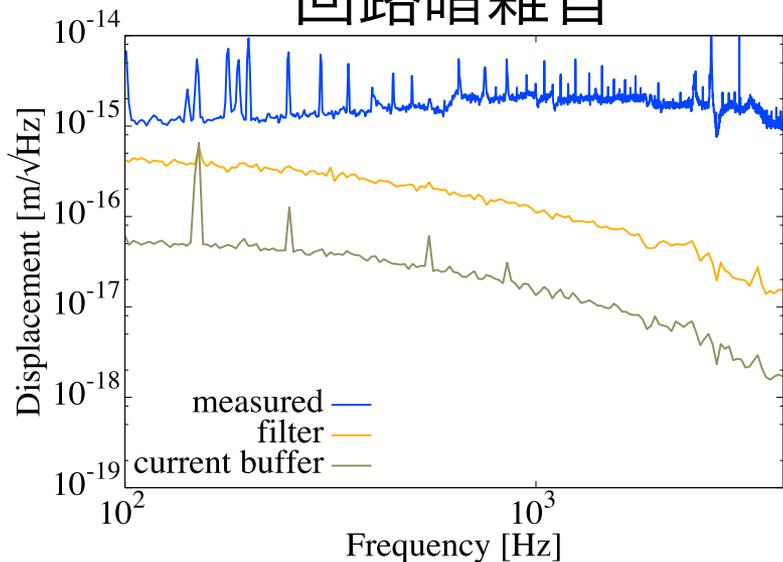
強度安定度評価



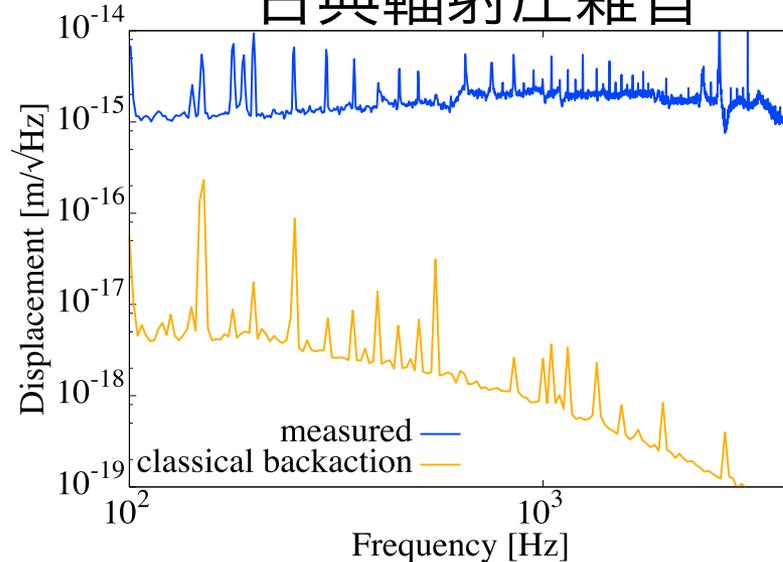
その他の雑音

15 mK 冷却時
のスペクトル

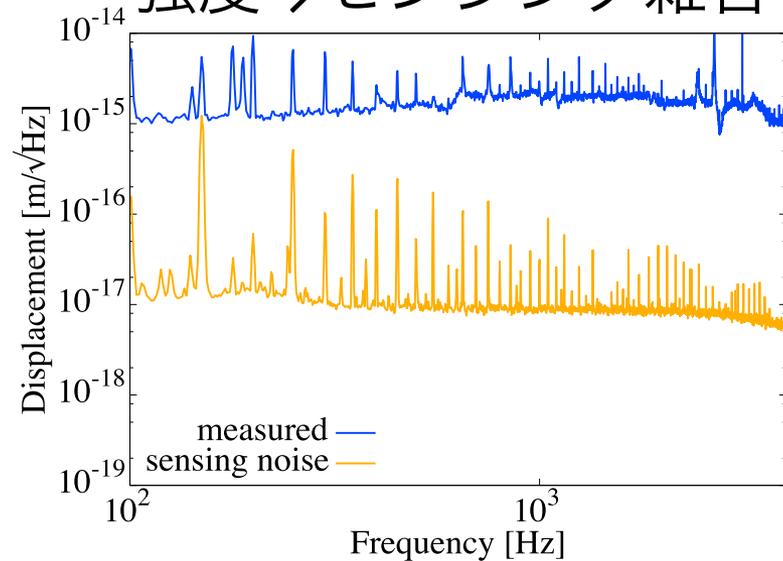
回路暗雑音



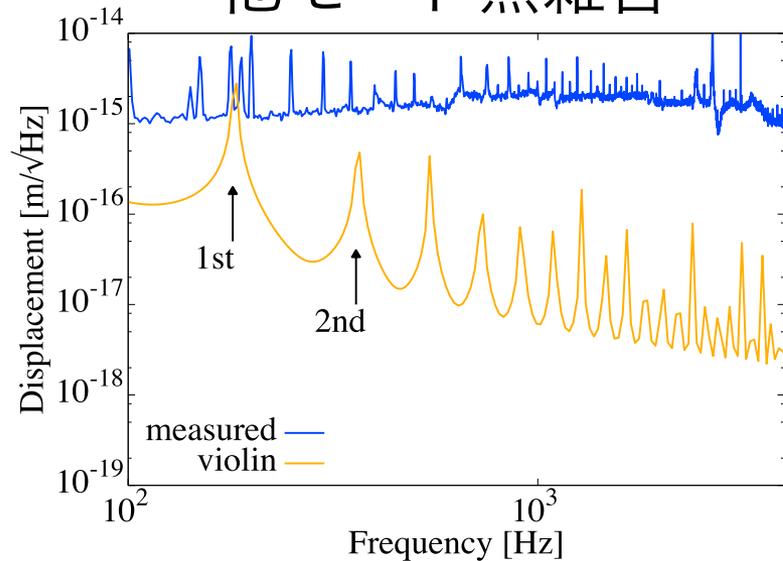
古典輻射圧雑音



強度→センシング雑音



他モード熱雑音



ブロックダイアグラム

