

# 輻射圧実験の詳細と 今後の展望

2015年4月16日 安東研中間報告会  
小森健太郎

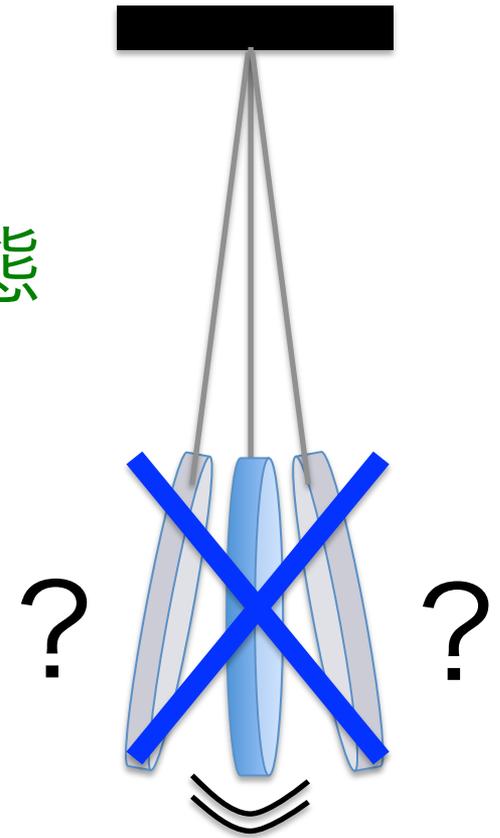
# 実験の動機

## ➤ 量子力学の観測問題

重たい物体の重ね合わせ状態

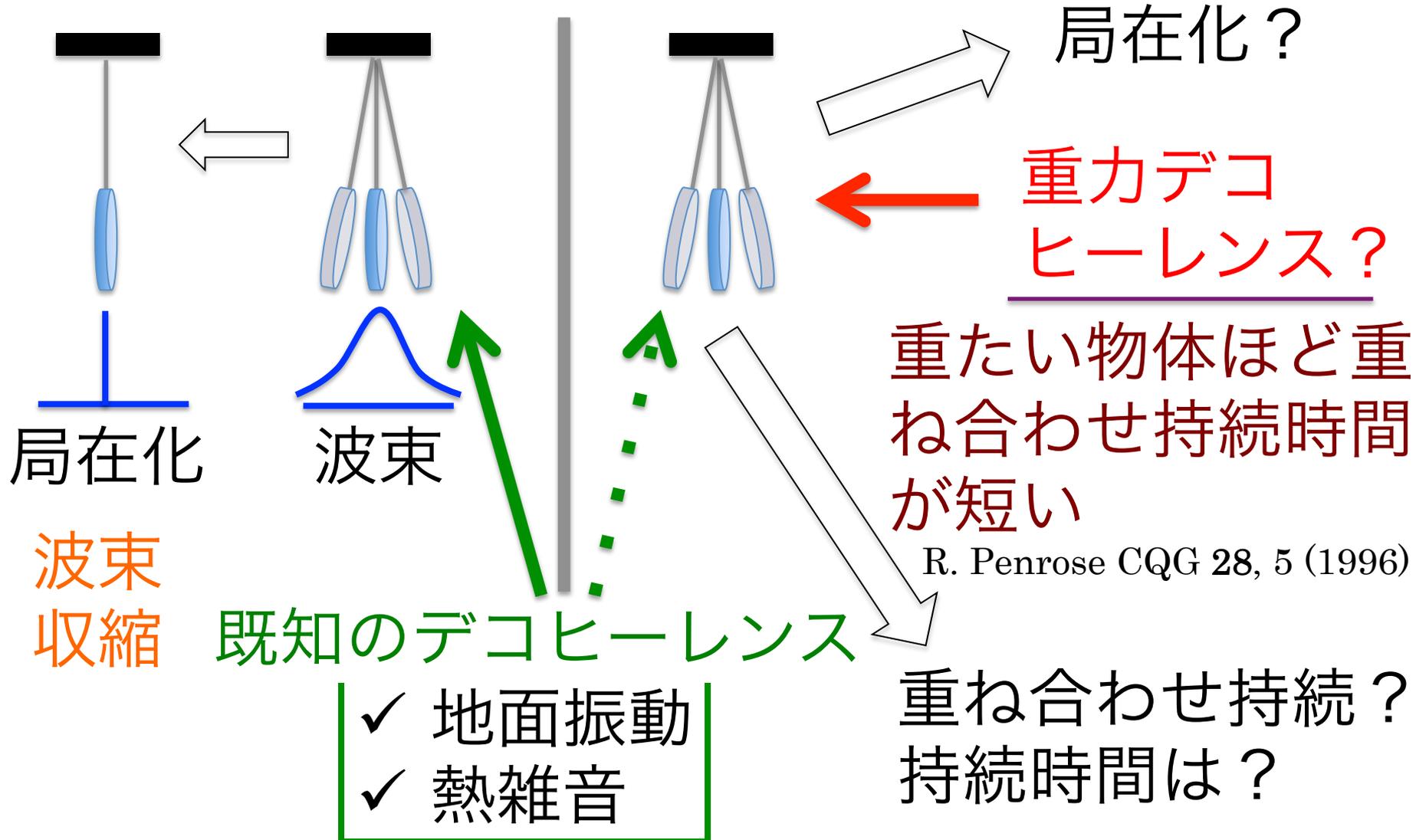
⇒ 観測例なし

- ✓ 単なる技術的な問題に過ぎない？
- ✓ 量子性を示さない根源的な機構が存在？



例：振り子

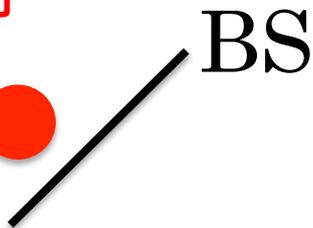
# 重たい物体の重ね合わせ



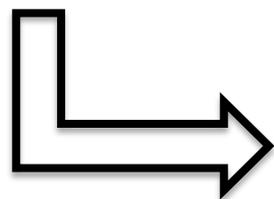
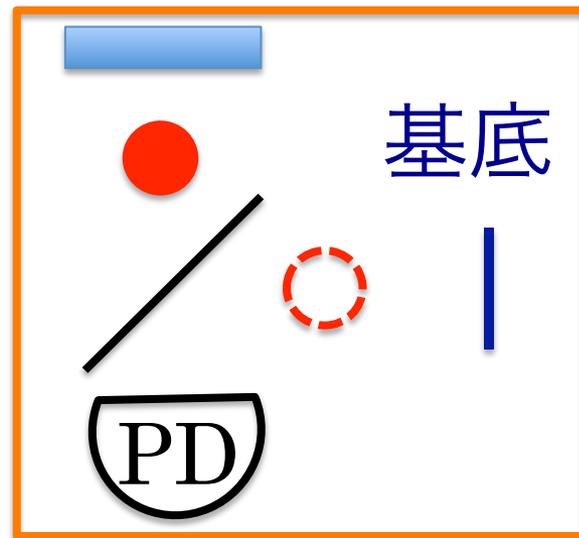
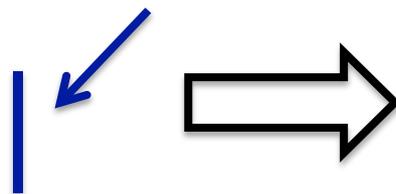
# 重力デコヒーレンスに向けて

単一光子

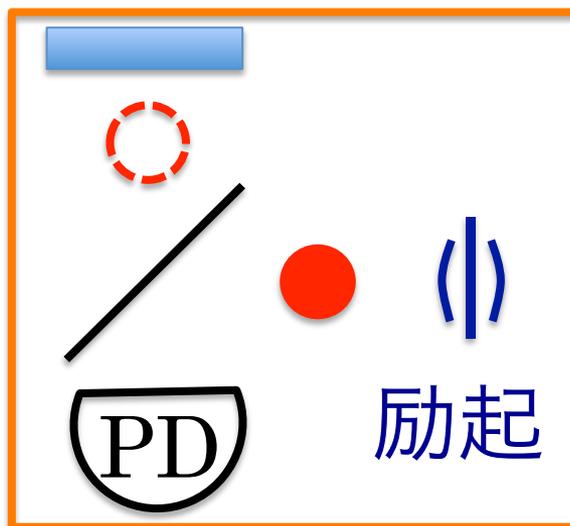
光源



基底状態まで  
冷えた振動子



マイケルソン  
干渉計

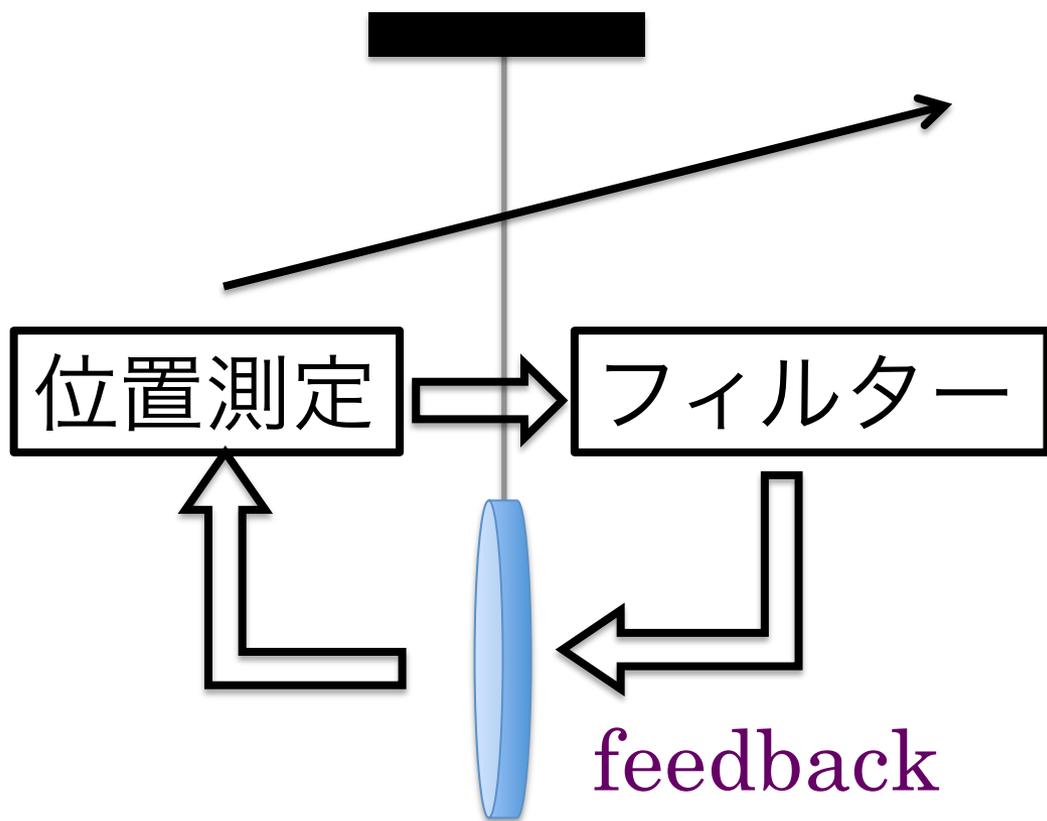


重ね合わせ  
状態

W. Marshall *et. al.* PRL  
91,13(2003)

# Ground State Cooling にむけて

## ➤ Feedback Cooling



振動子の揺れを抑制

基底状態到達条件

基底状態の揺らぎ

VII

検出器の雑音



量子放射圧揺らぎ

V

振り子の熱雑音

必要条件

# 必要条件達成のための工夫

Laser光の量子放射圧揺らぎ > 振り子の熱雑音

➤ 振り子を光共振器の一端として利用

高い共振器内パワー

- ✓ 高反射率の鏡
- ✓ 入射光量の増加

LASER

Fabry-Perot  
共振器

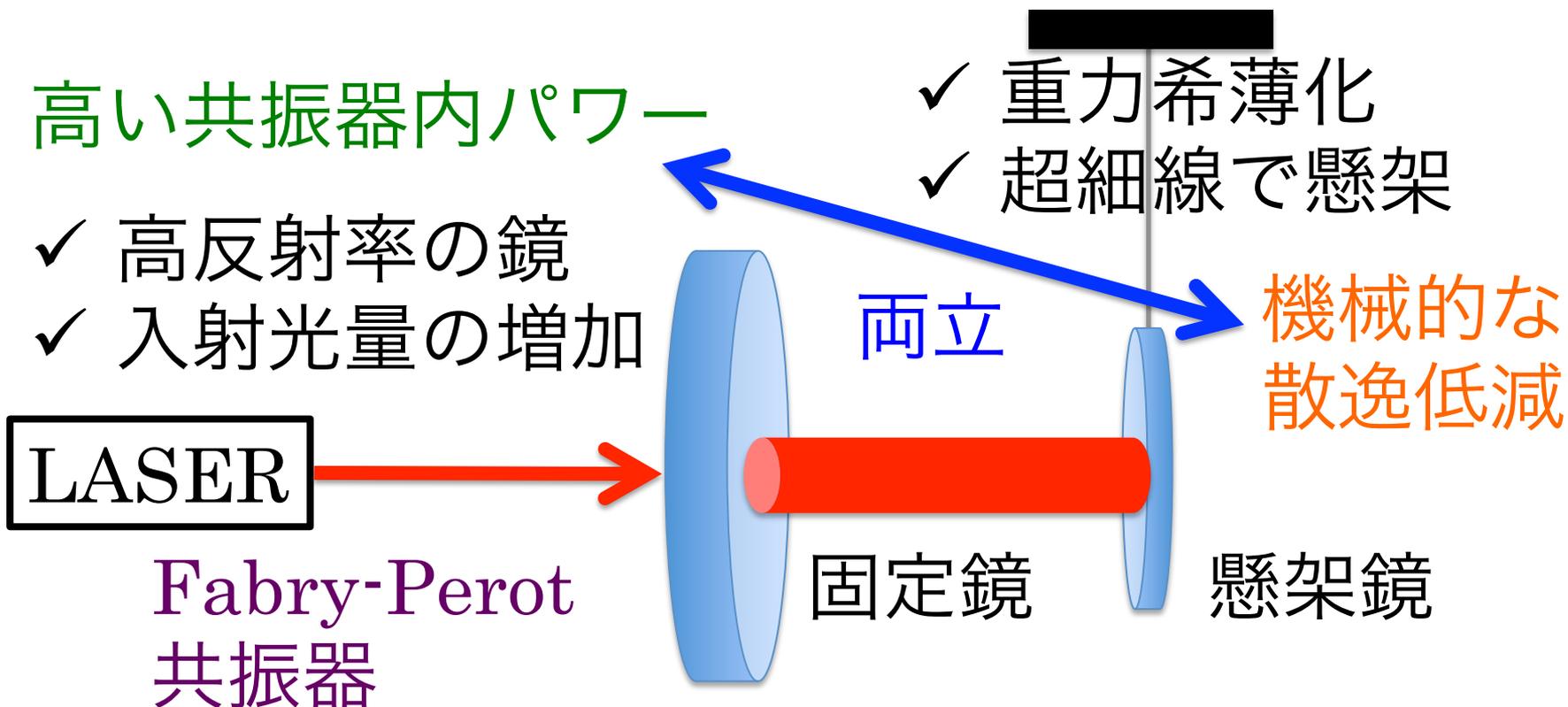
- ✓ 重力希薄化
- ✓ 超細線で懸架

機械的な  
散逸低減

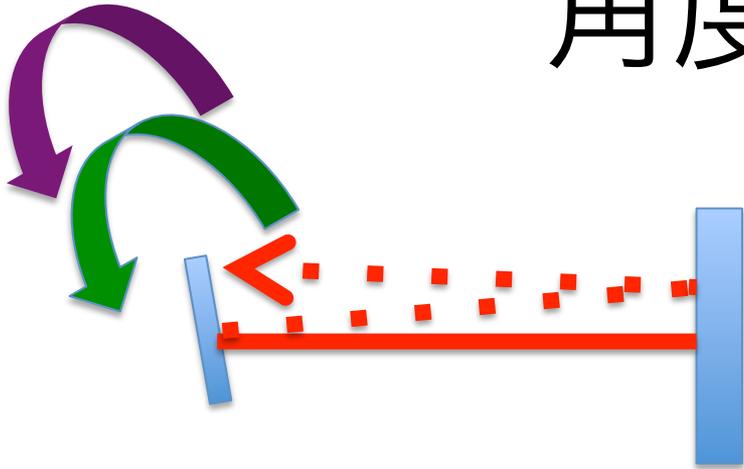
両立

固定鏡

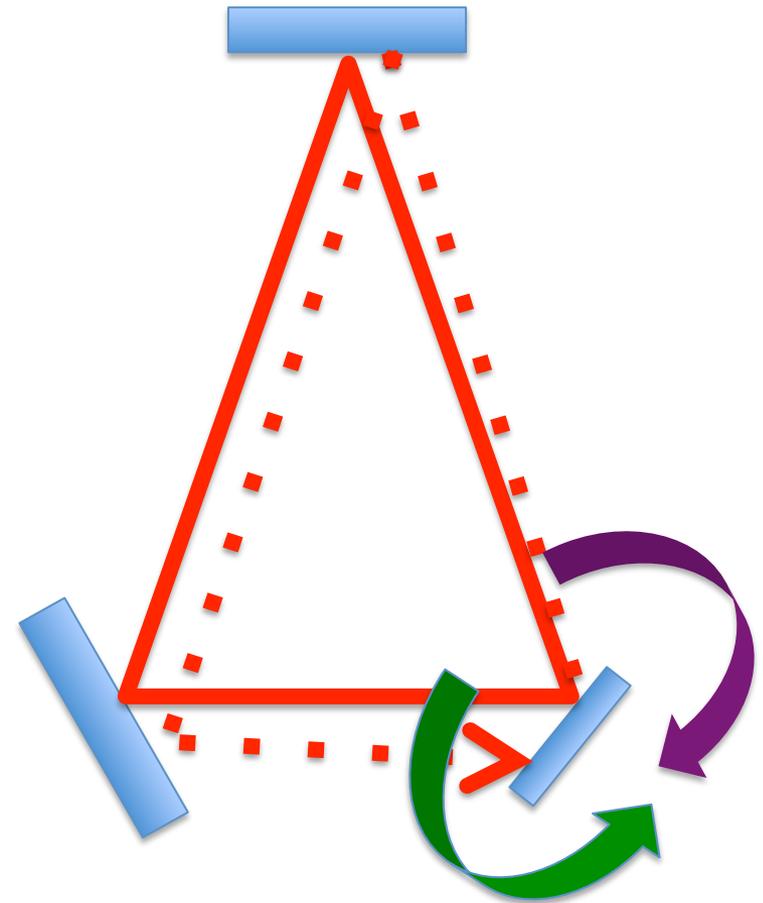
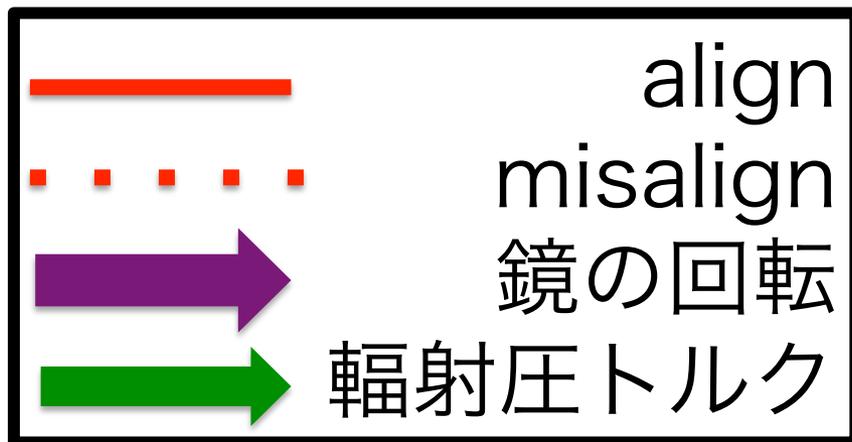
懸架鏡



# 角度安定性

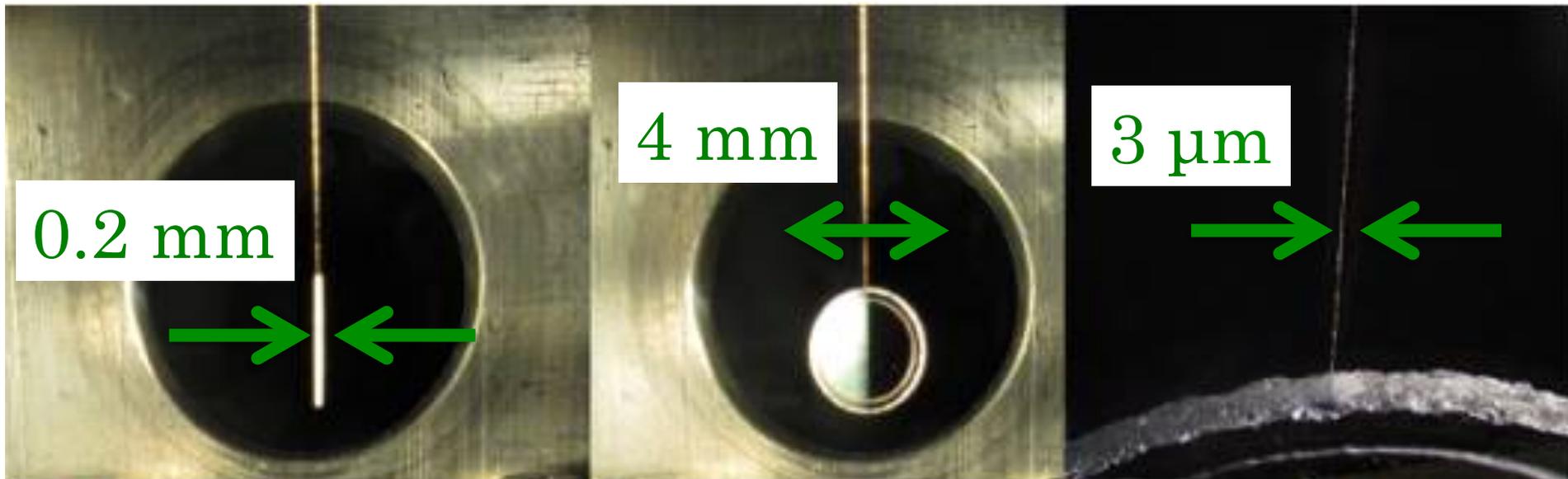


線形共振器：不安定



三角共振器：安定

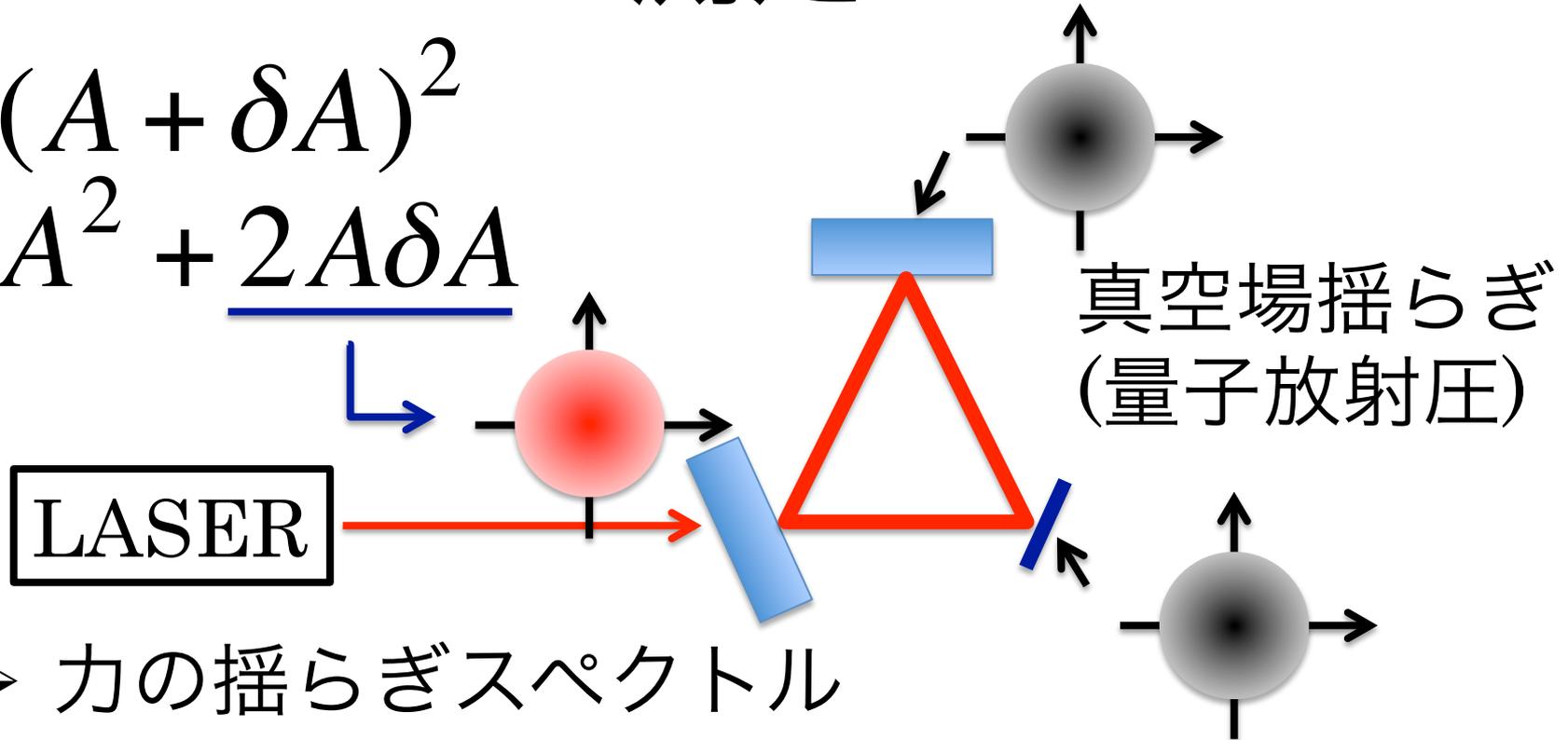
# 懸架鏡



- 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

# 測定

$$\sim (A + \delta A)^2 \\ \sim A^2 + \underline{2A\delta A}$$

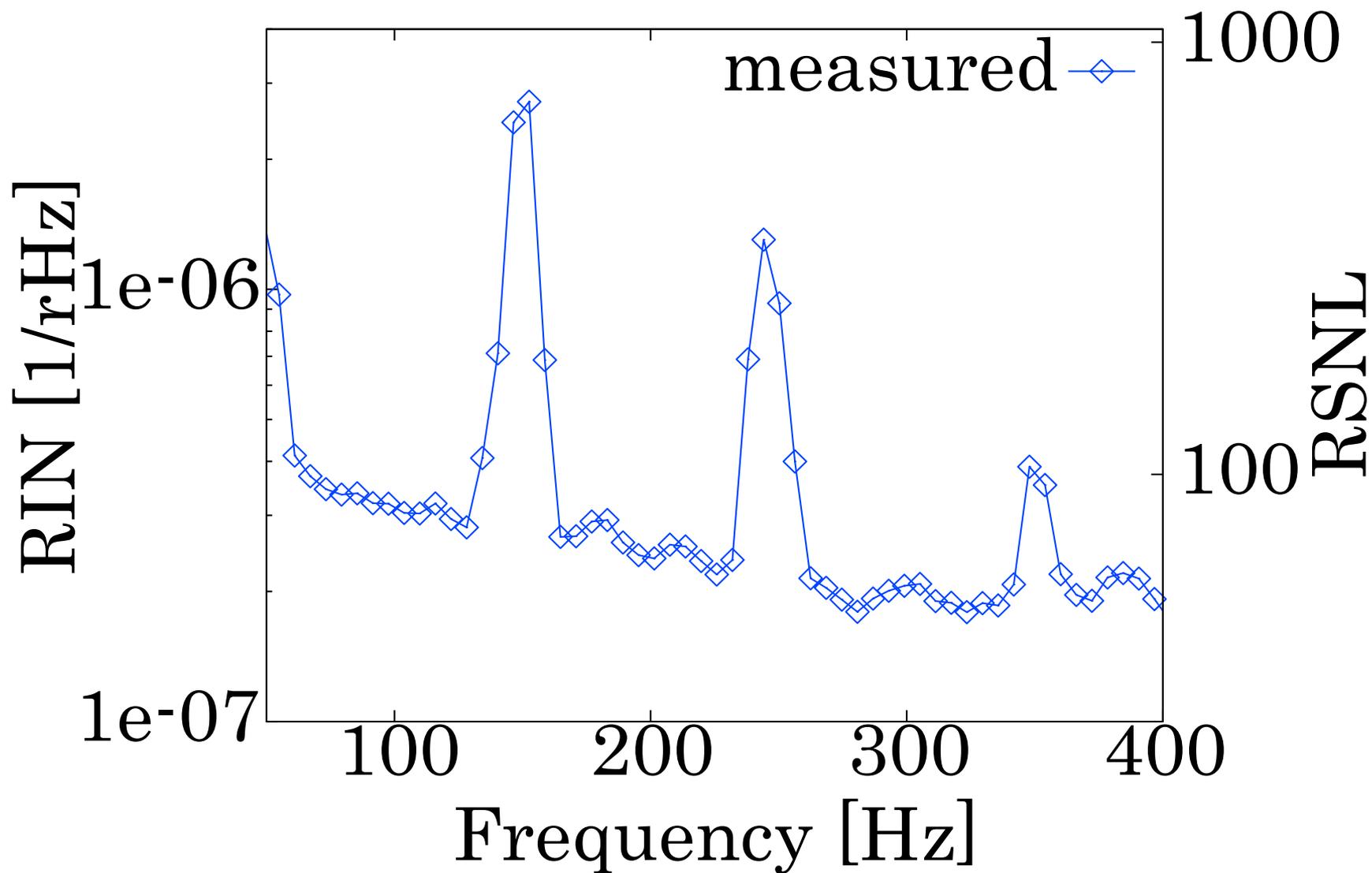


## ➤ 力の揺らぎスペクトル

- ✓ 振りに加わる力の揺らぎの強さ
- ✓ 入射Laser光量に対する依存性

## ➤ 入射Laser光の強度揺らぎ

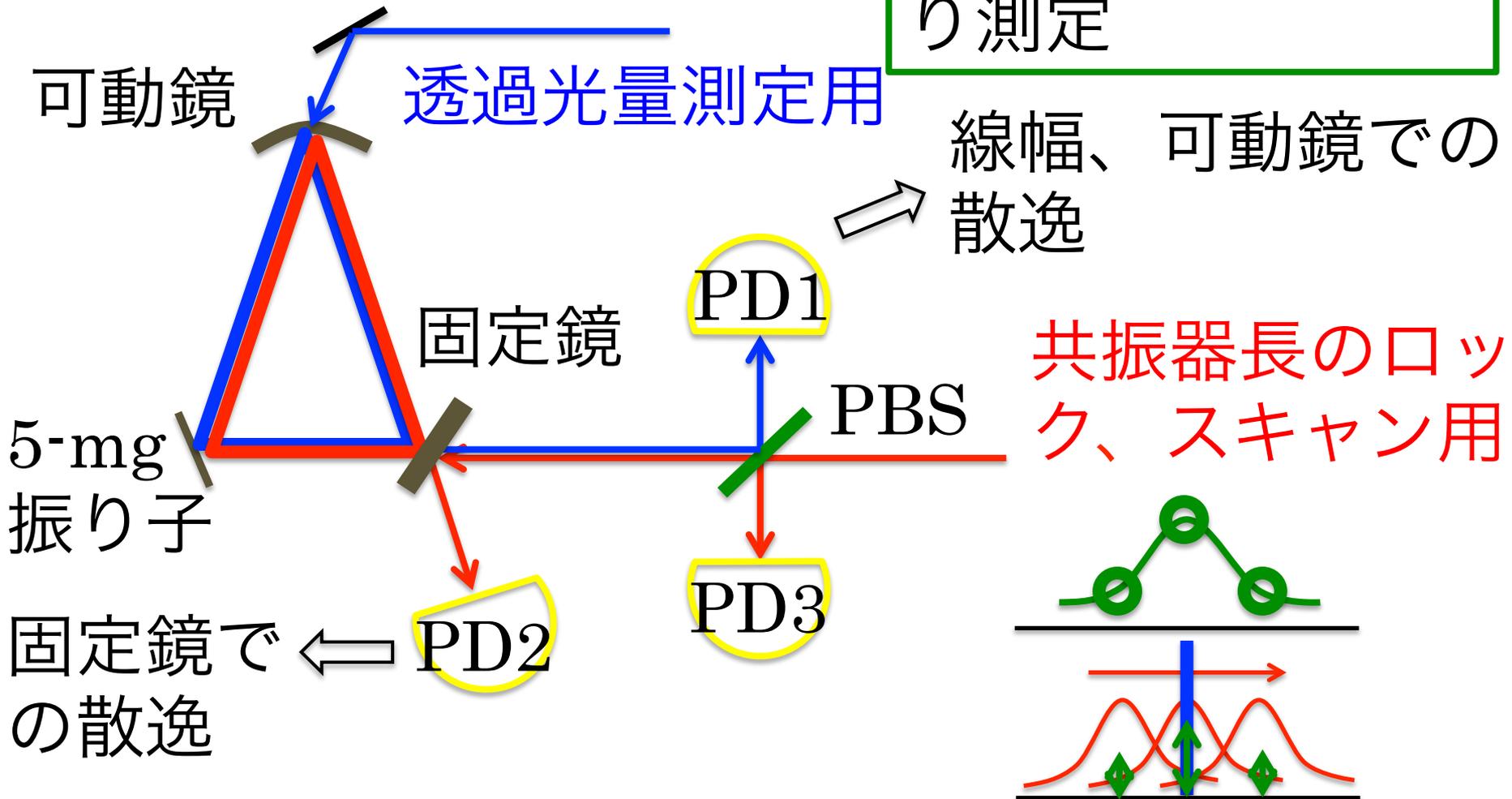
# Laser光の強度揺らぎ



# 光学パラメータ測定

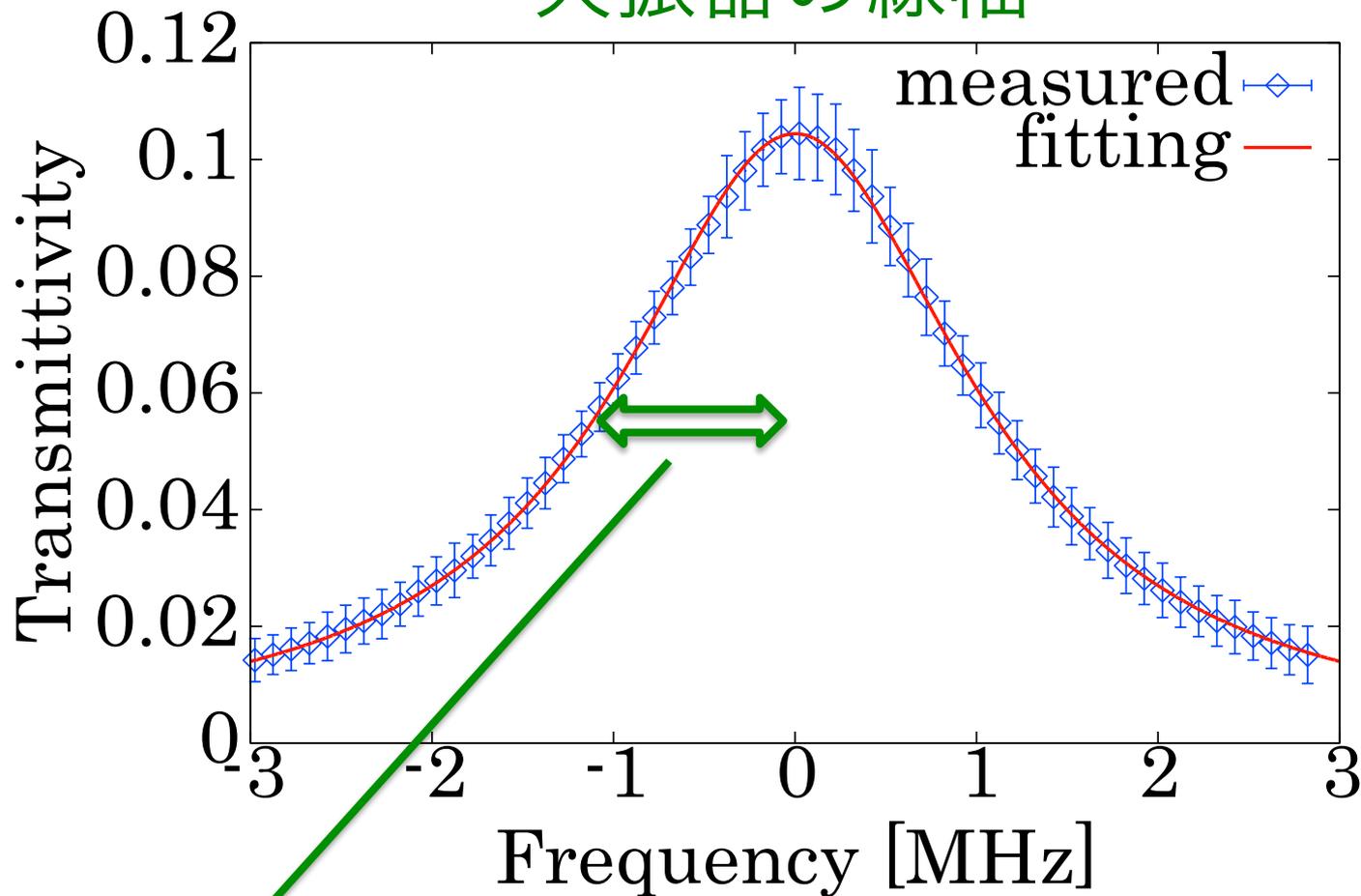
✓ 共振器の線幅

Cavity scan により測定



# 光学パラメータ測定

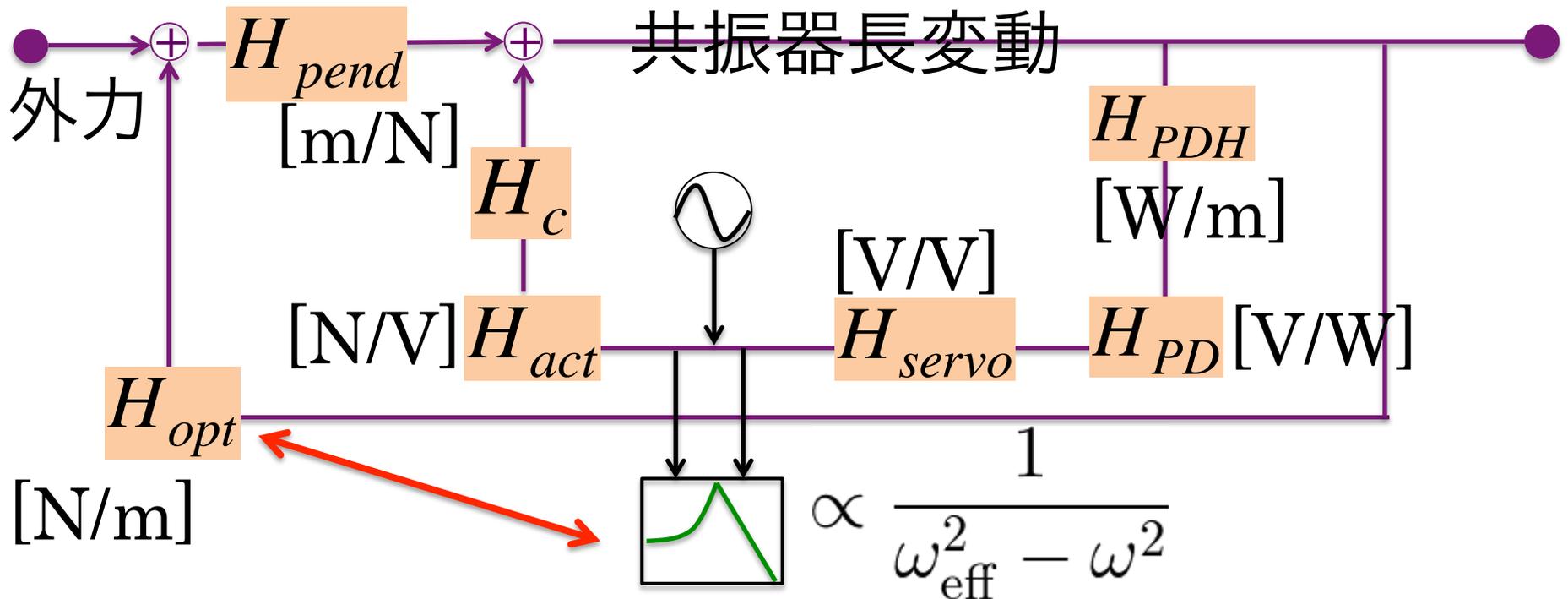
## 共振器の線幅



$$\kappa/2\pi = 1.181 \pm 0.003 \text{ MHz} \quad \mathcal{F} = 1.47 \pm 0.03 \times 10^3$$

# 機械光学パラメータ測定

- ✓ Single-photon coupling rate;  $g$

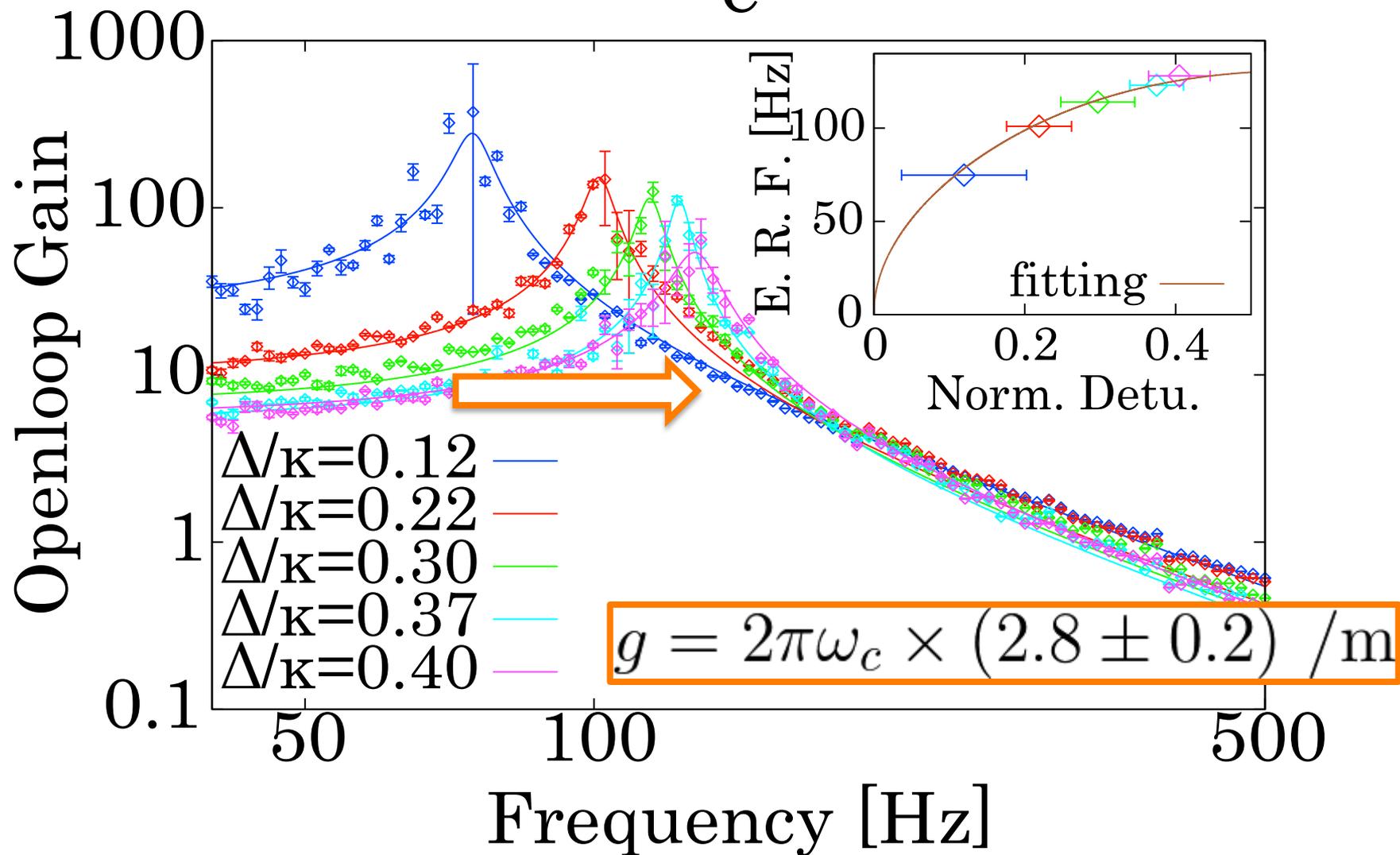


オープンループ伝達関数

光バネの効果を見ることで測定可能

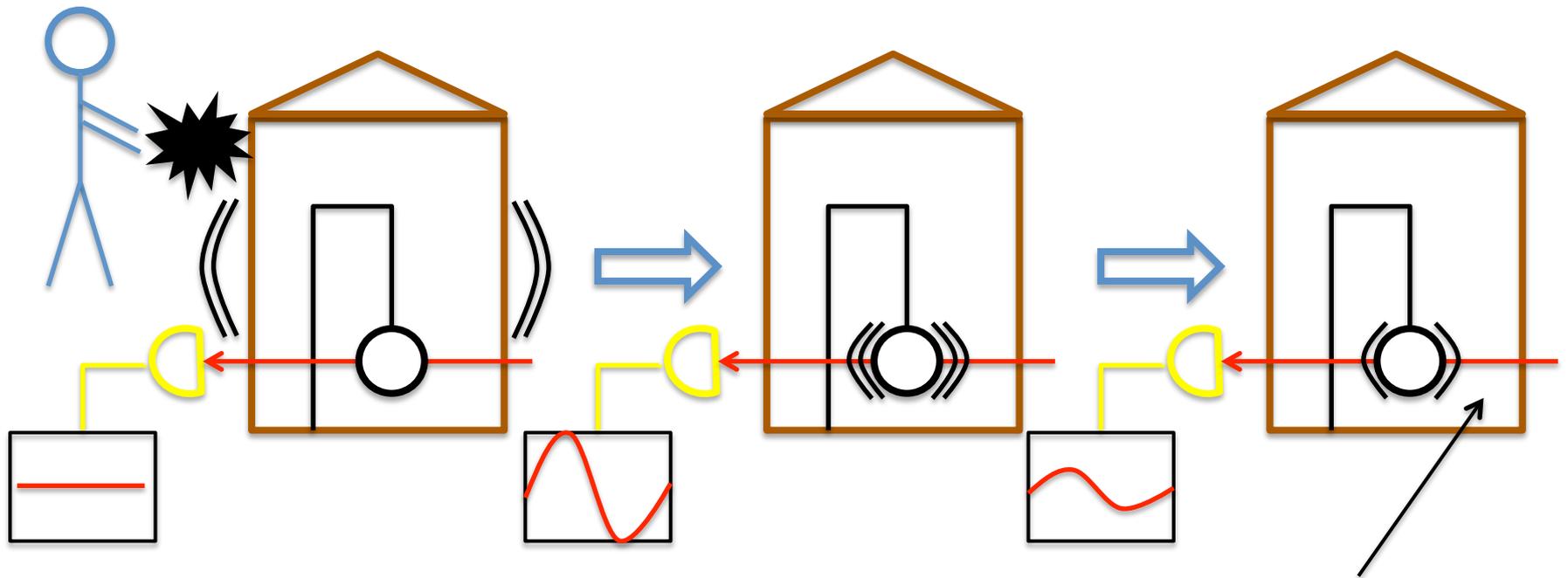
# 機械光学パラメータ測定

e



# 機械パラメータ測定

✓ 振り子のQ値

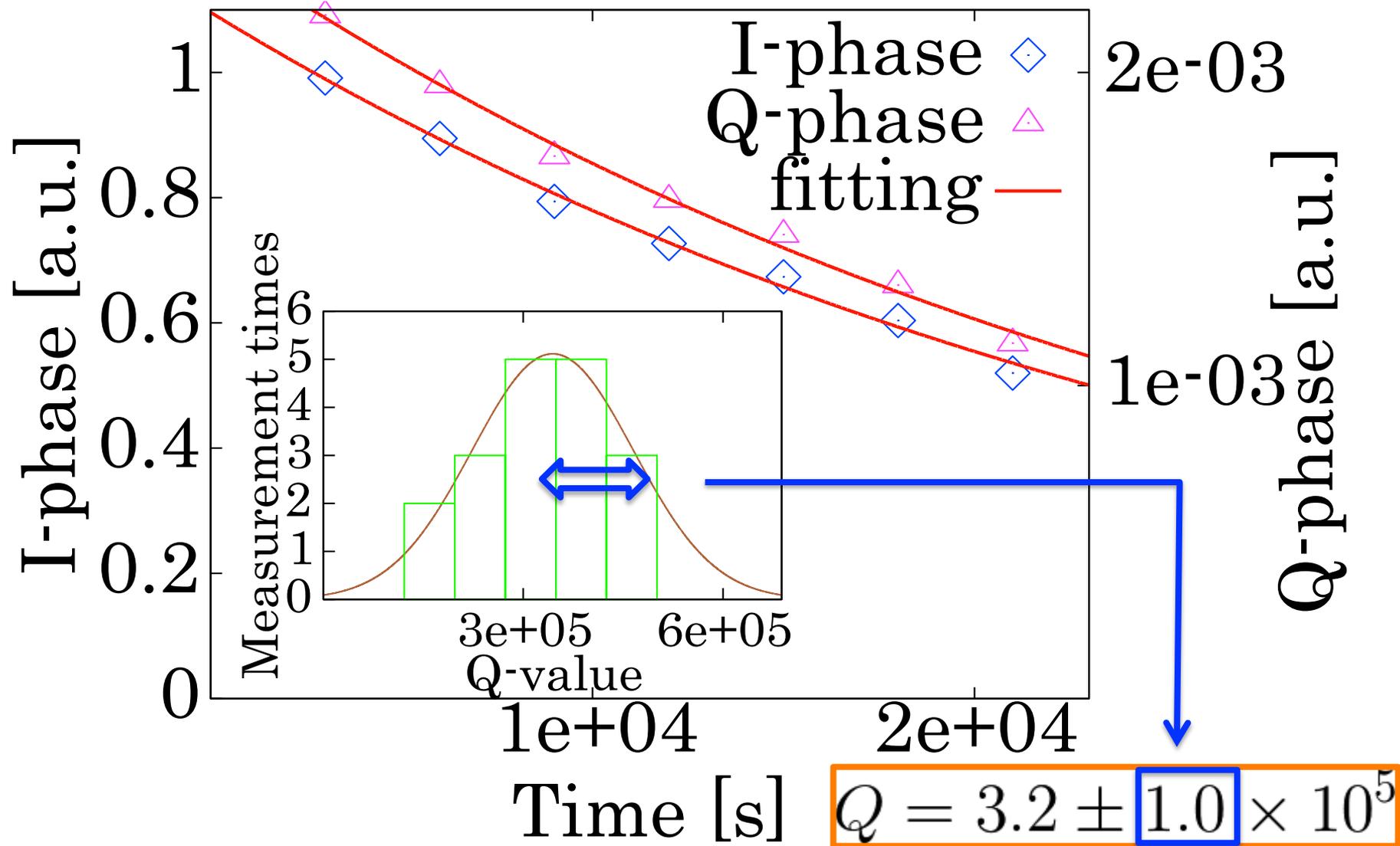


- リングダウン測定
- シャドーセンシング

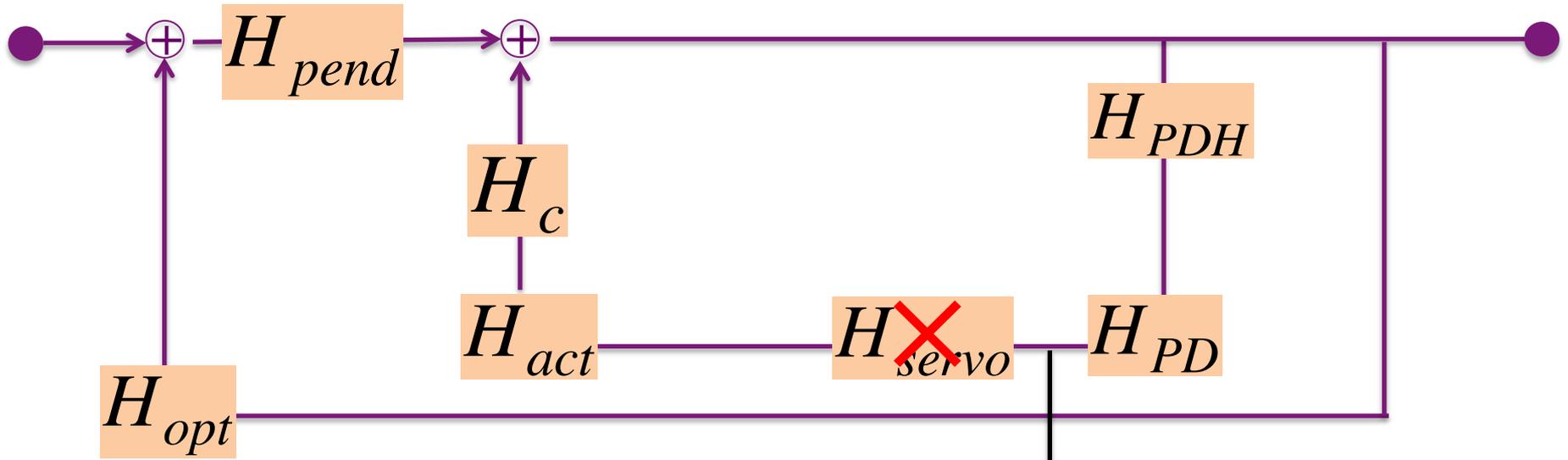
$1e-3 \text{ Pa}$

$$Q_{gas} \sim 10^6$$

# 機械パラメータ測定



# エラー信号測定



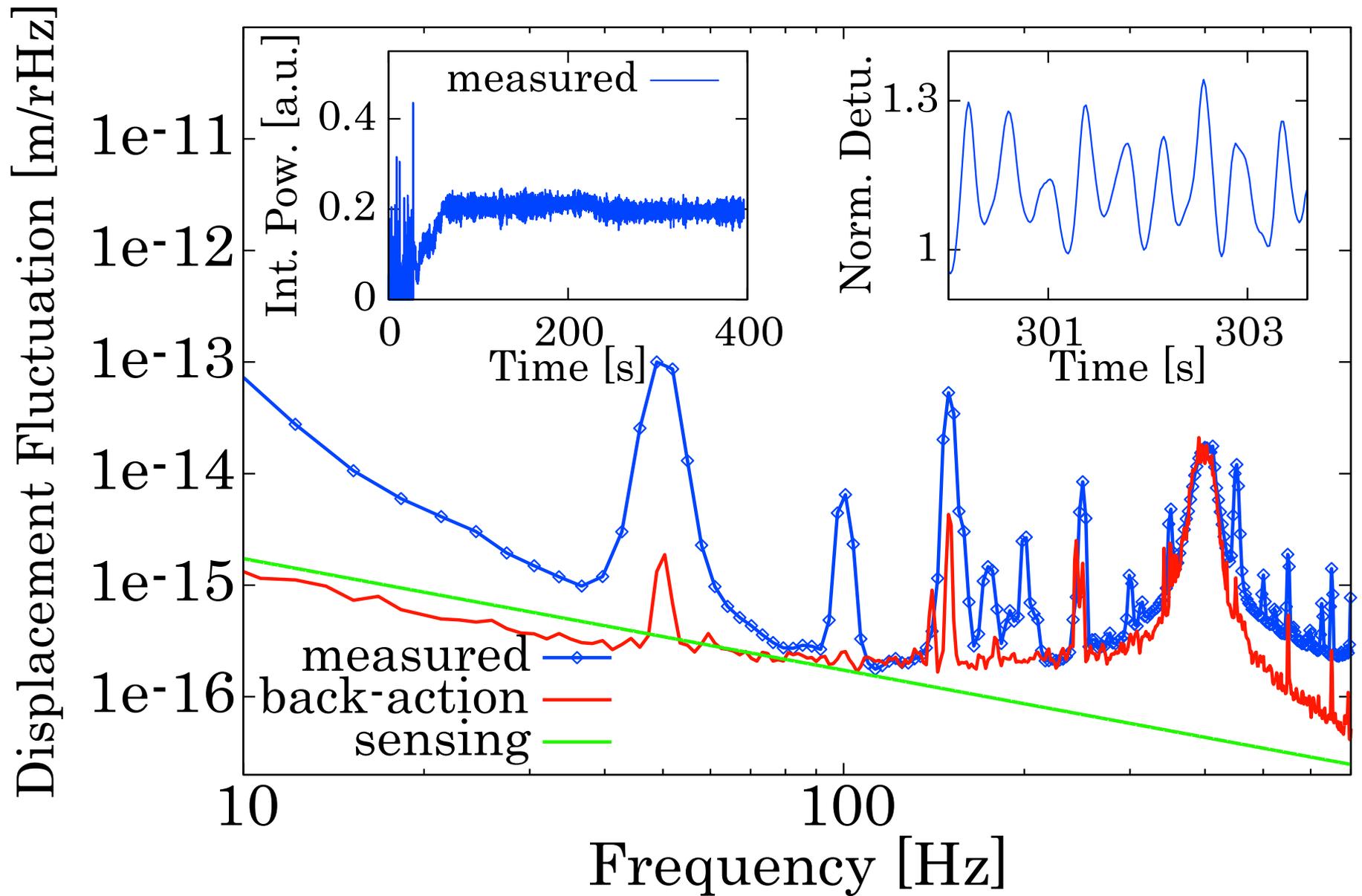
$H_{servo} = 0$  (フィードバックなし)

エラー信号

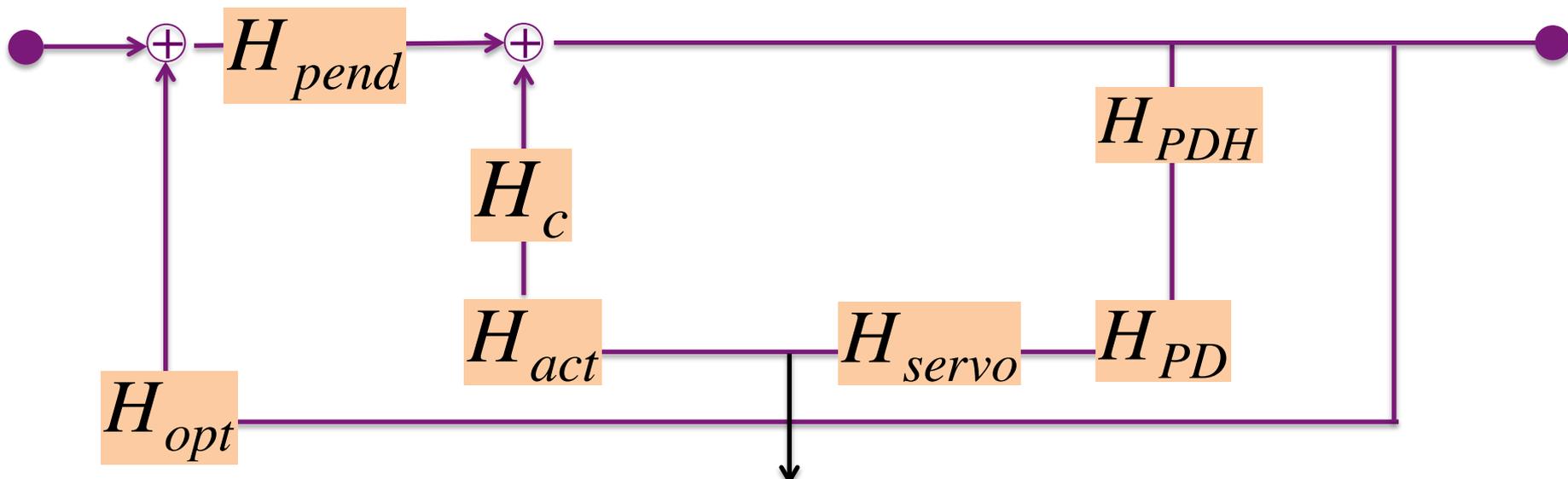
➤ 振り子の変位の直接測定が可能

共振点ではセンシング  
雑音に強い

# エラー信号測定



# フィードバック信号測定

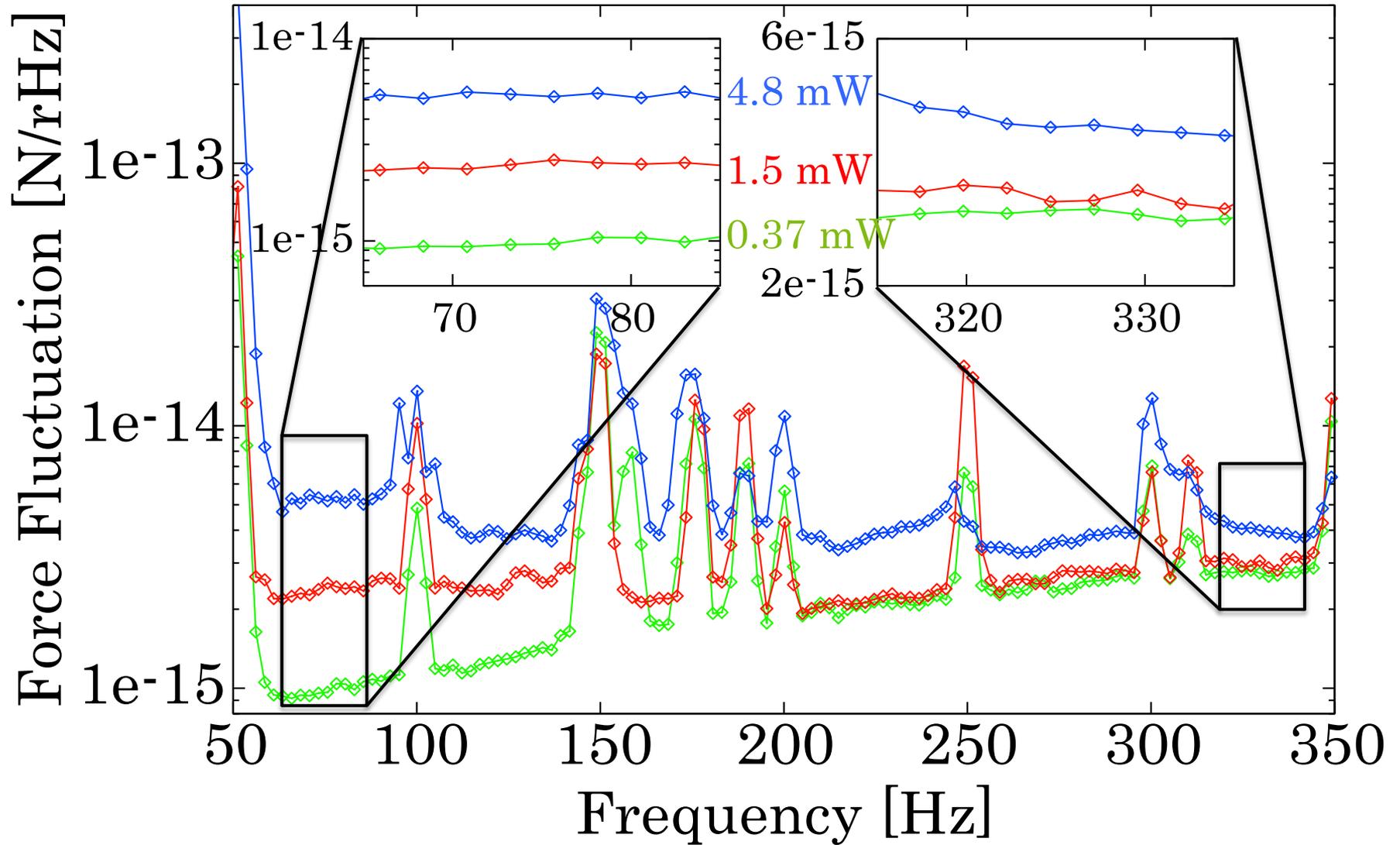


フィードバックあり フィードバック信号

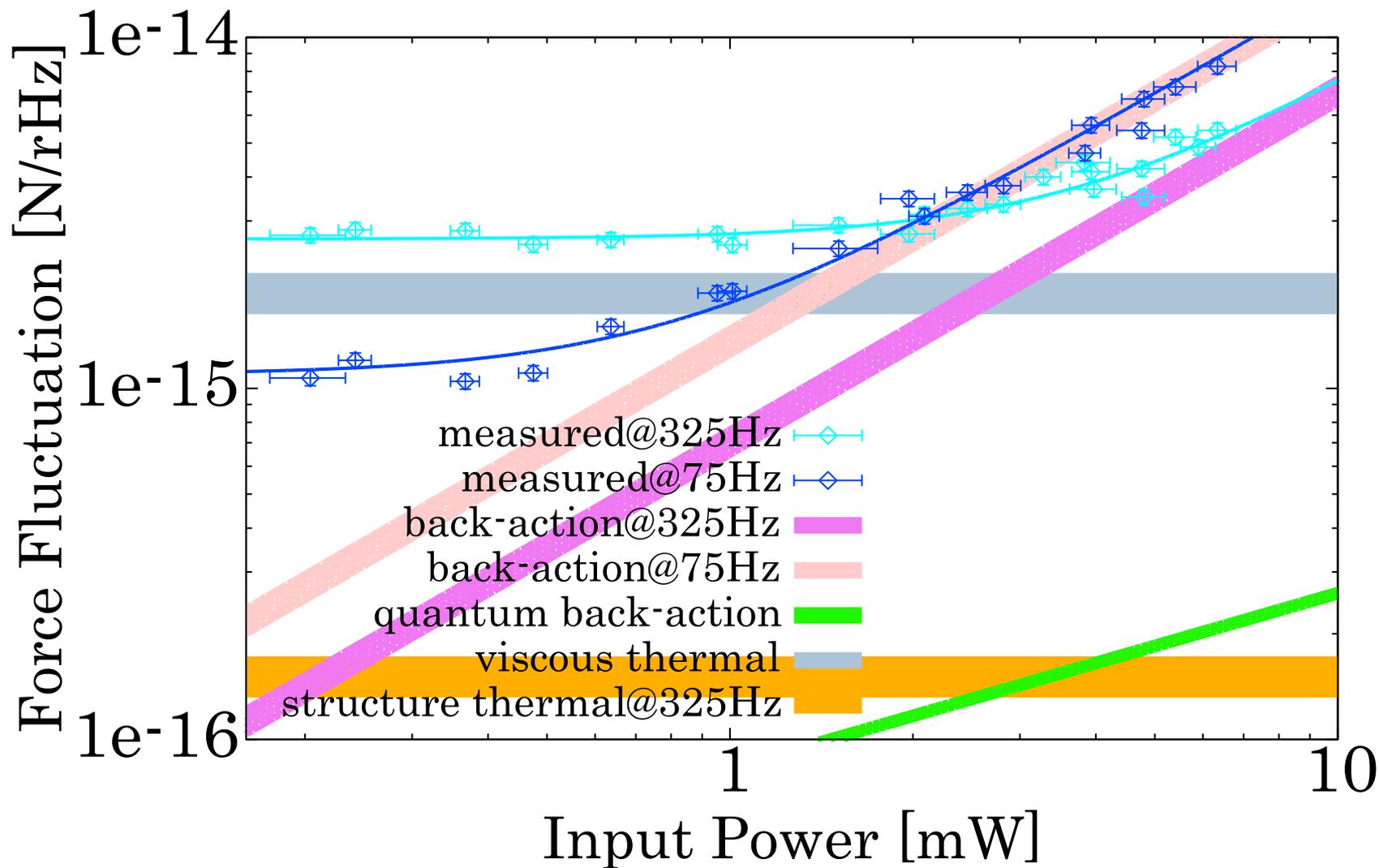
↳ 感受率の影響を受けない

入射光量に対する揺らぎの  
大きさの依存性が測定可能

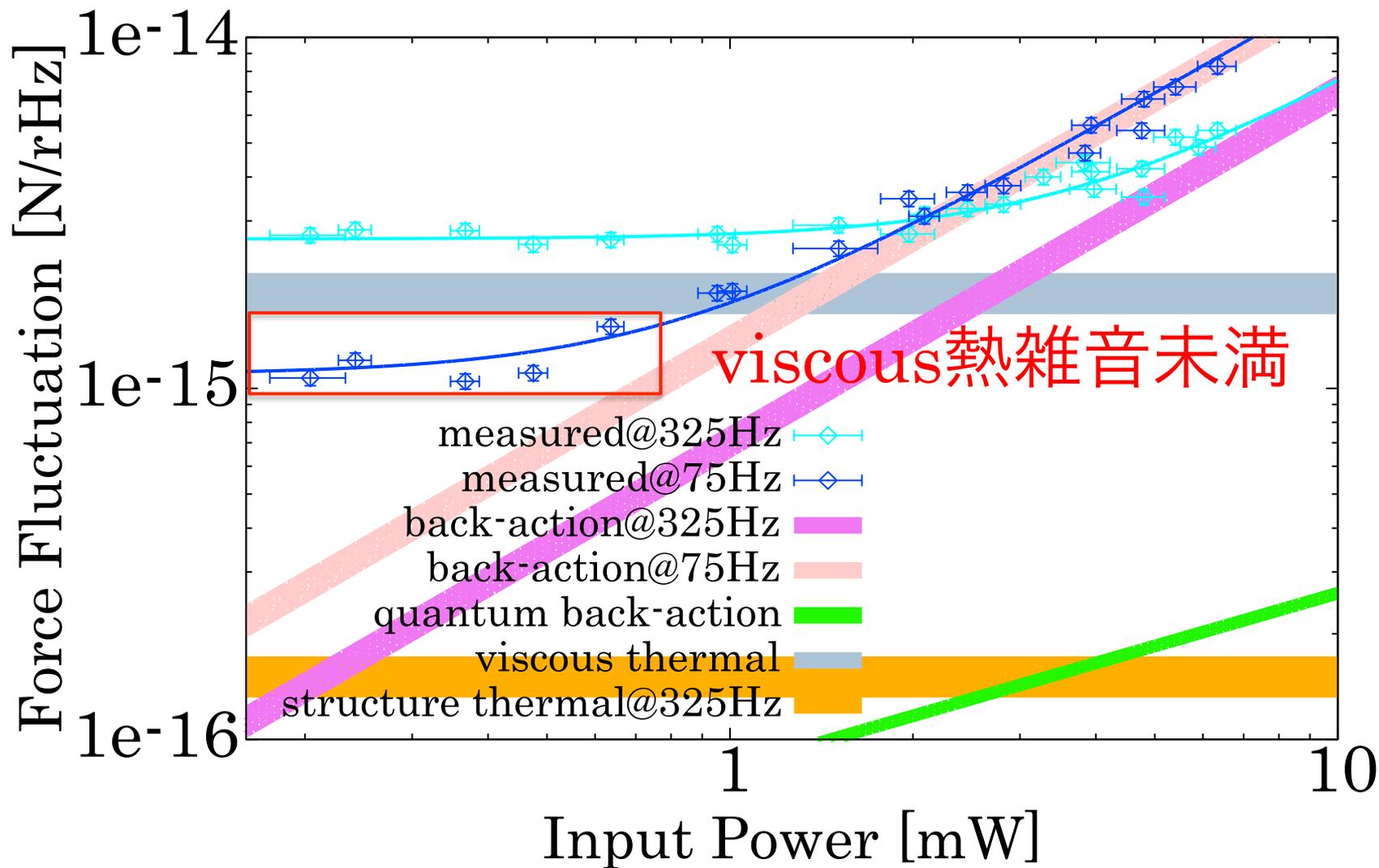
# 力の揺らぎ



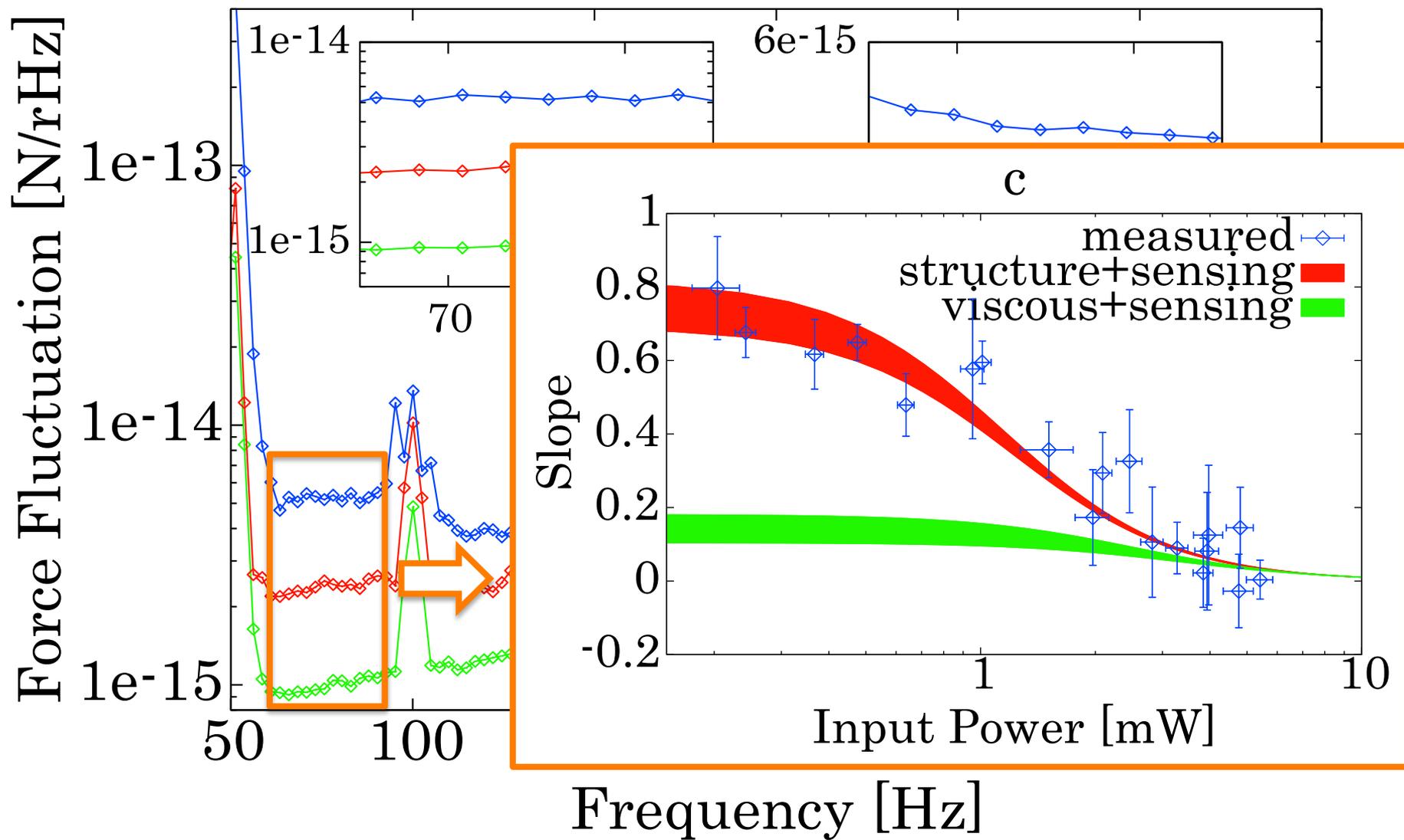
# 入射光量依存性



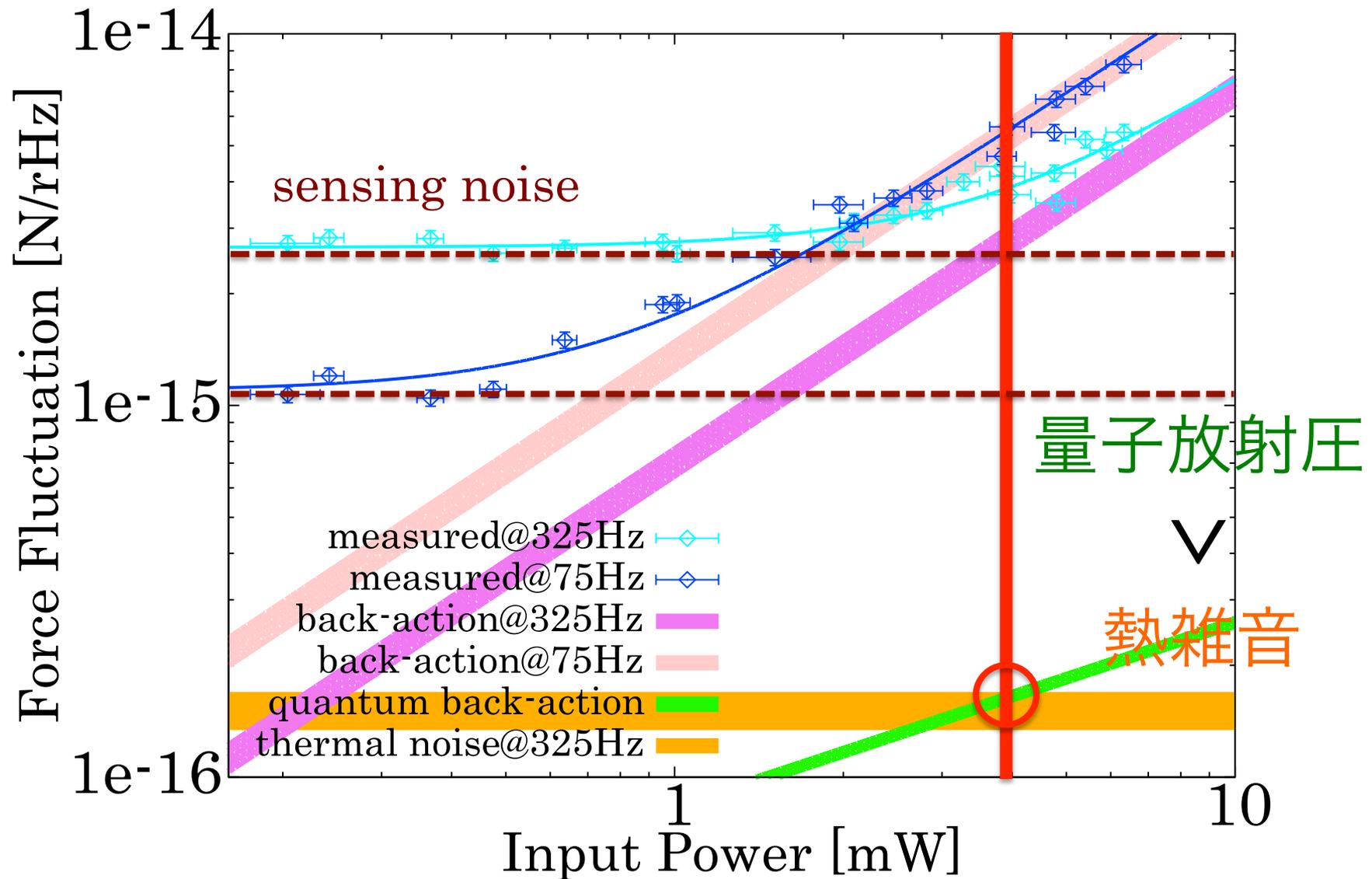
# 入射光量依存性



# スペクトルの傾き

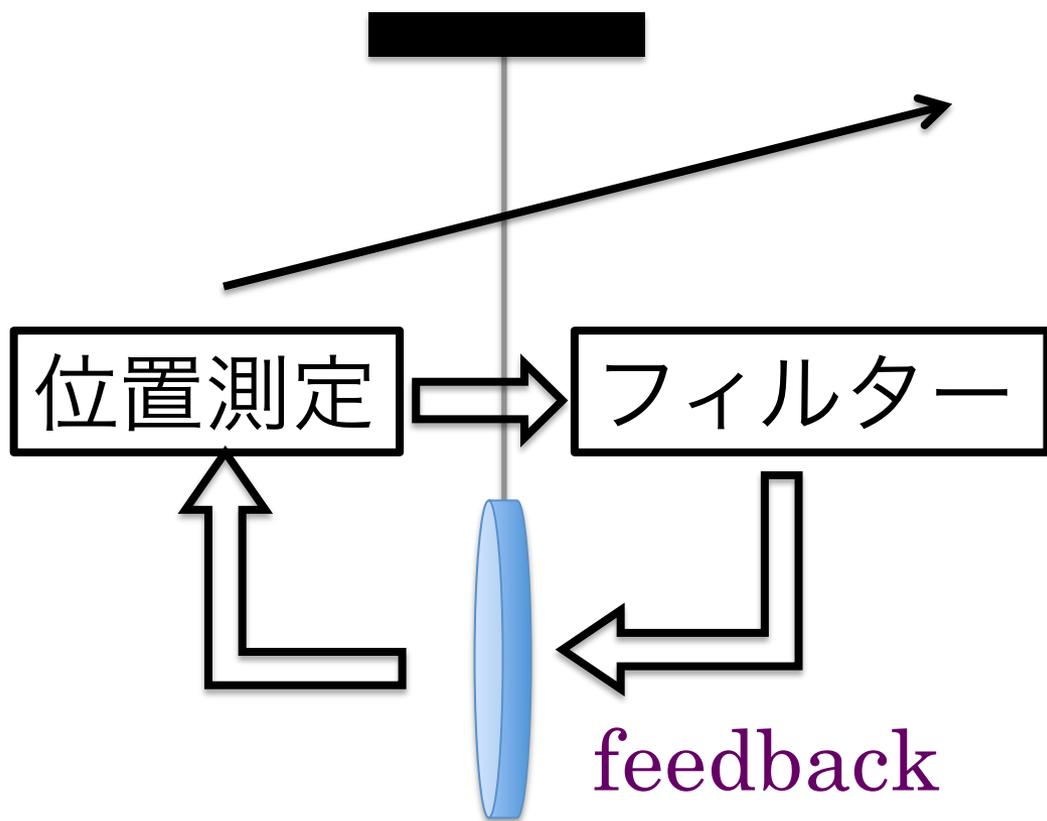


# Laser光量に対する依存性



# 基底状態冷却にむけて

## Feedback Cooling



振動子の揺れを抑制

基底状態到達条件

基底状態の揺らぎ

VII

検出器の雑音



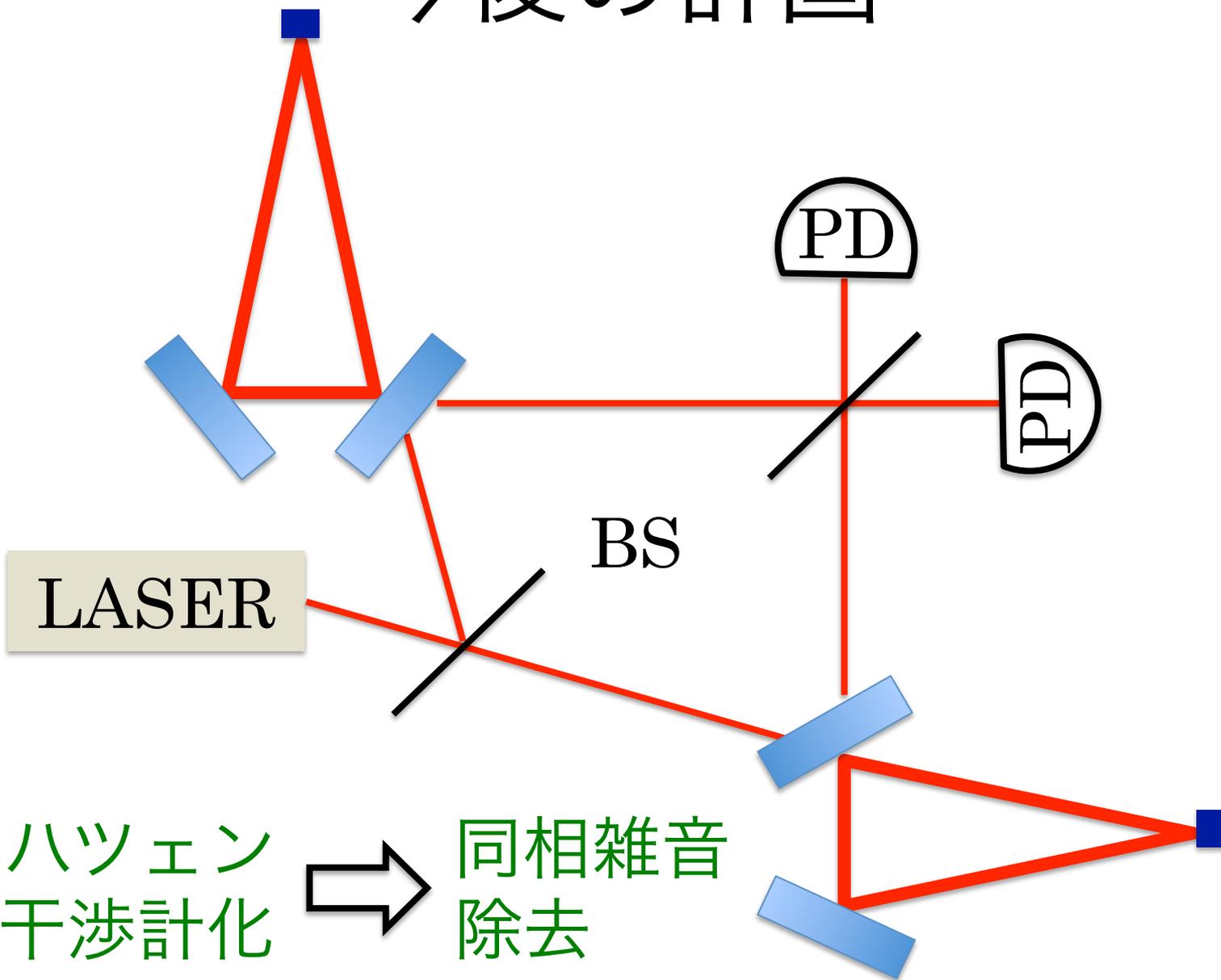
量子放射圧揺らぎ

V

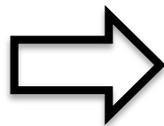
振り子の熱雑音

必要条件

# 今後の計画

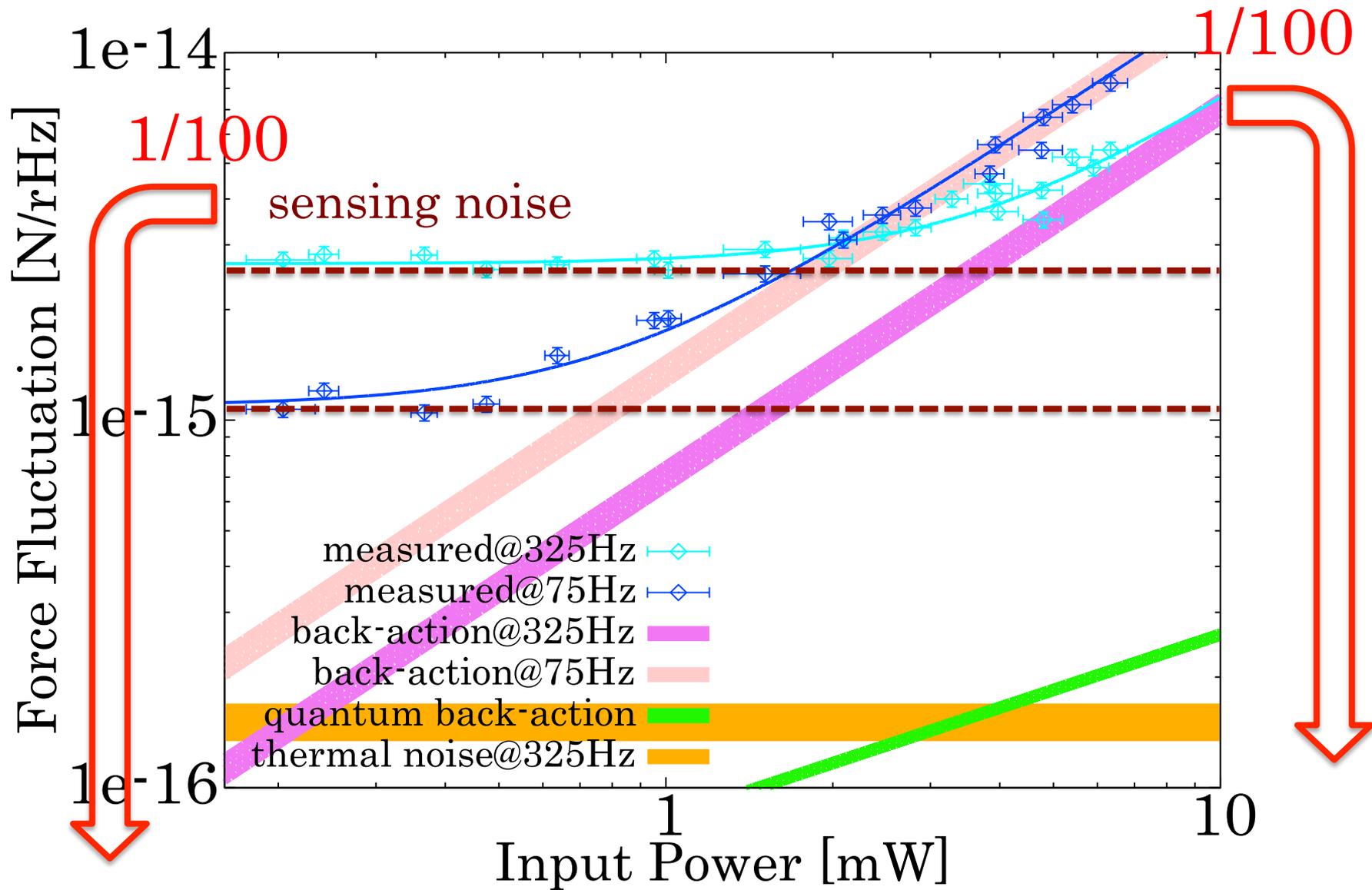


マッハツェン  
ダー干渉計化

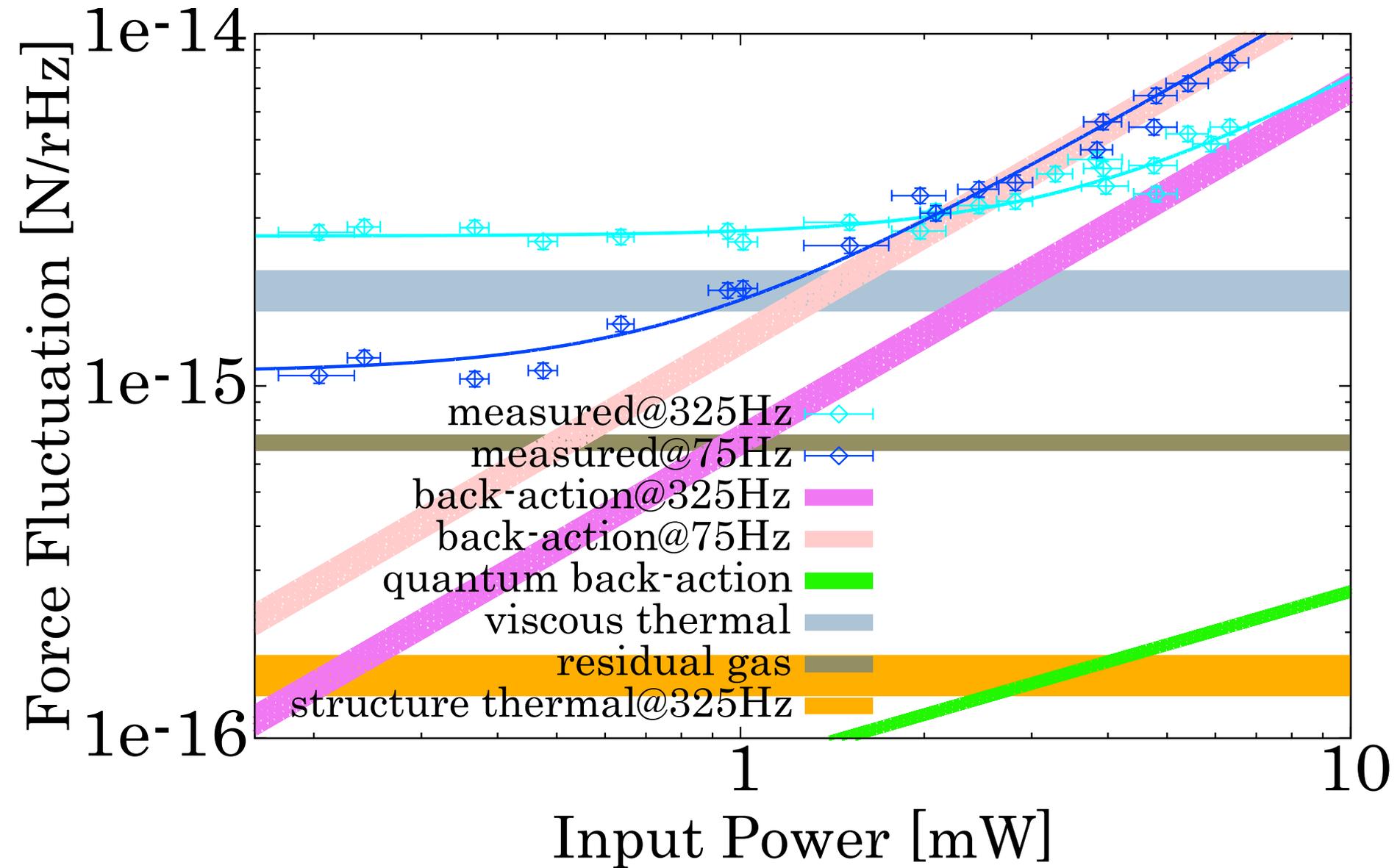


同相雑音  
除去

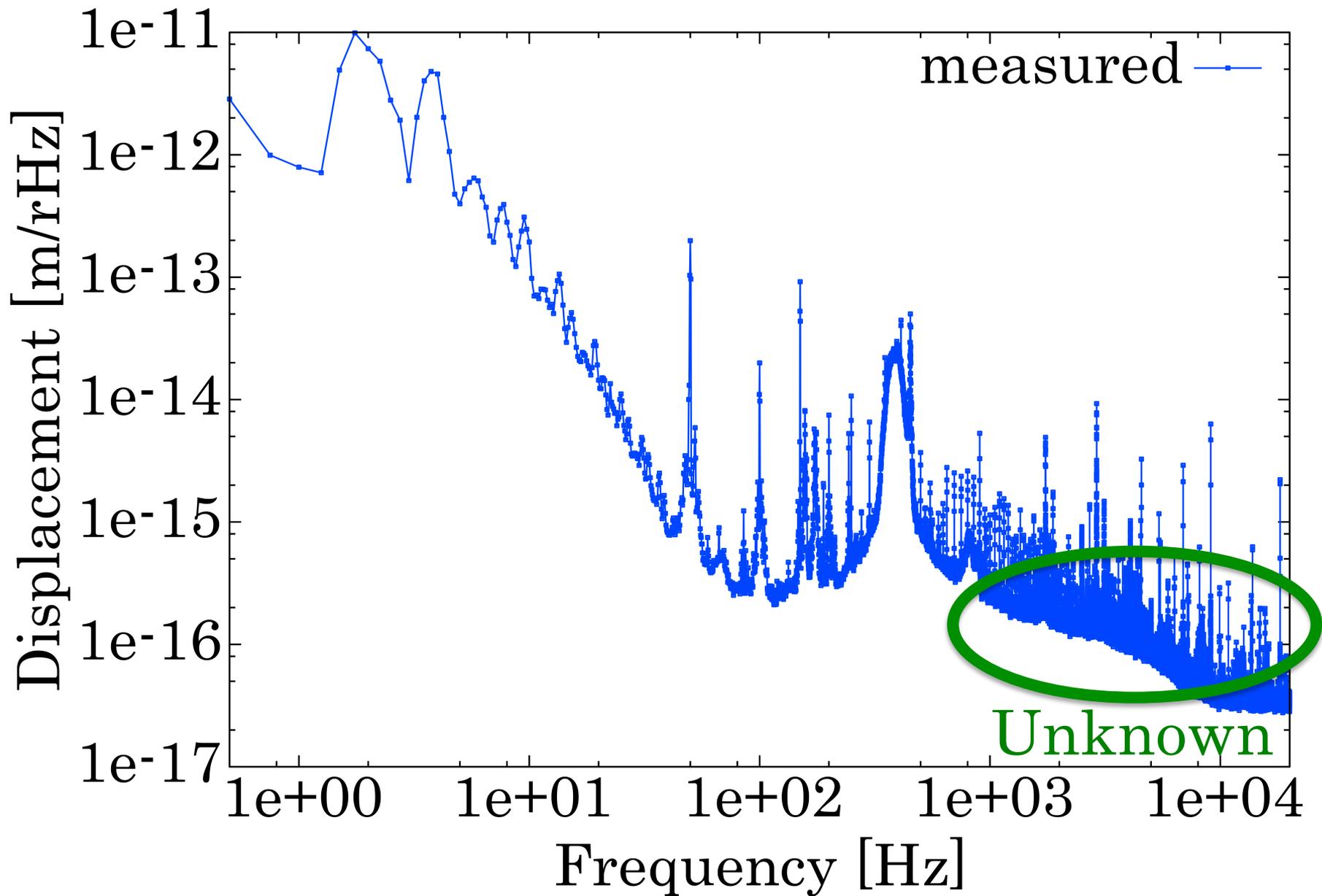
# 今後の計画



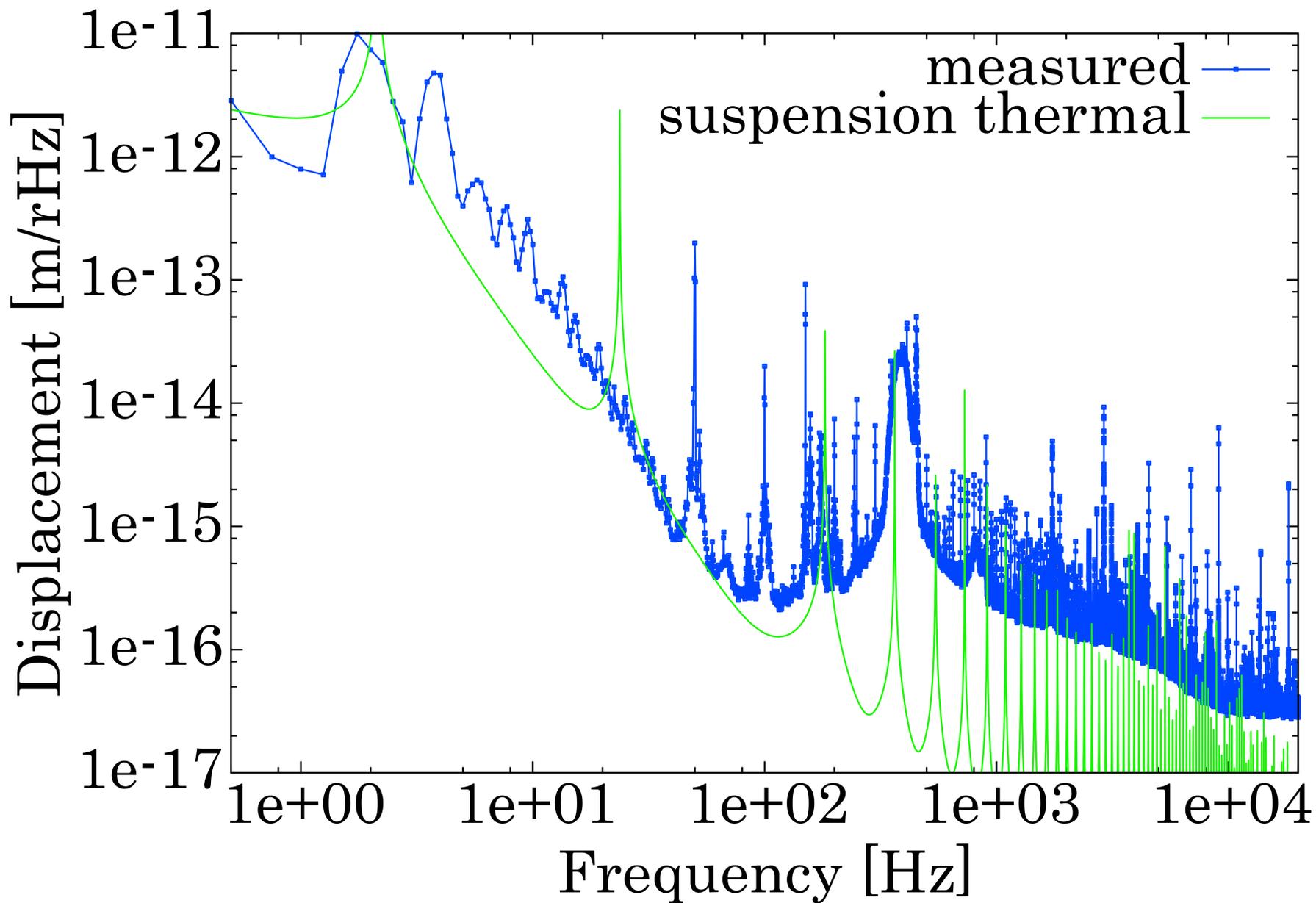
# 残留ガスによる熱雑音



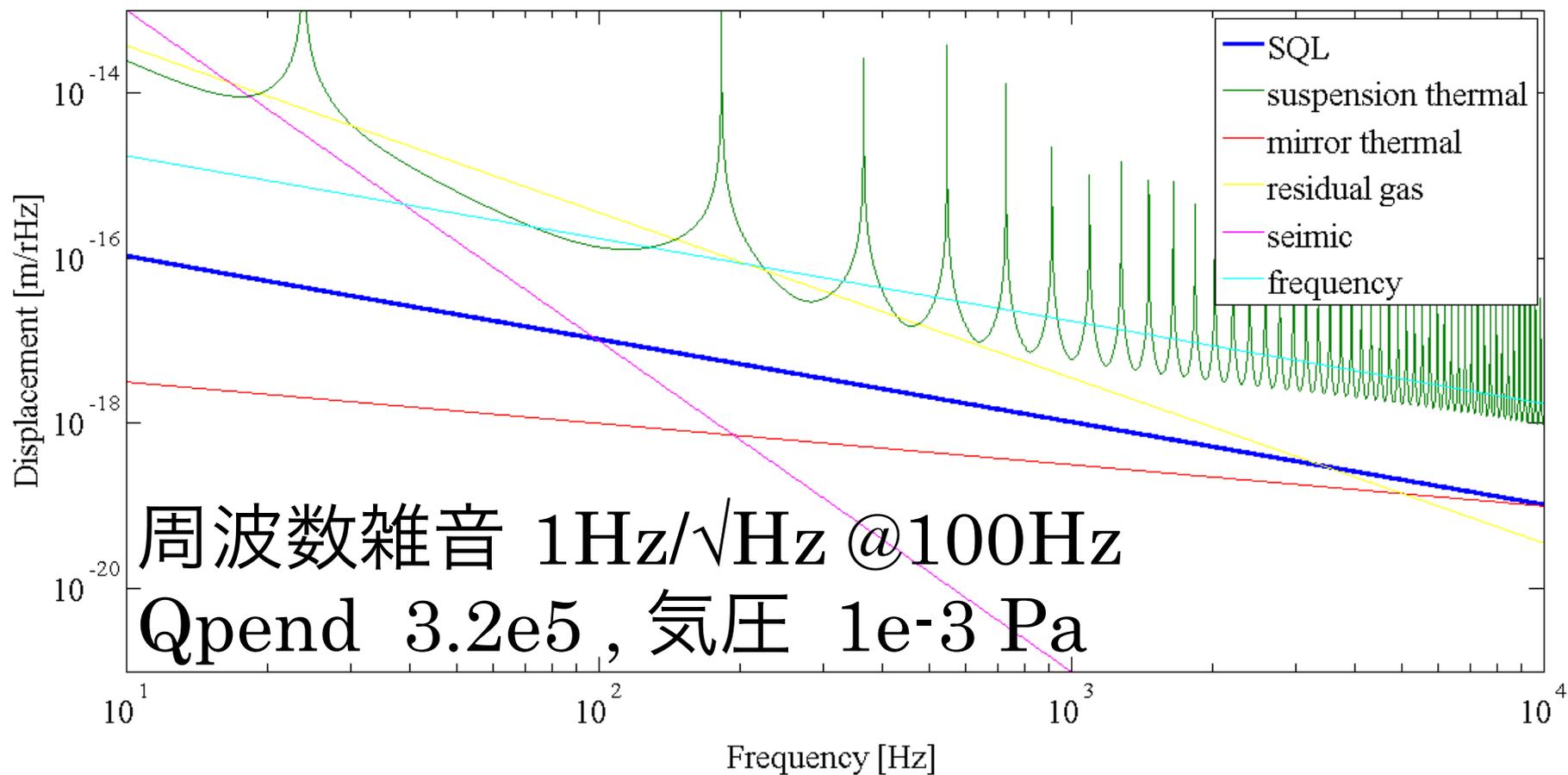
# エラー信号



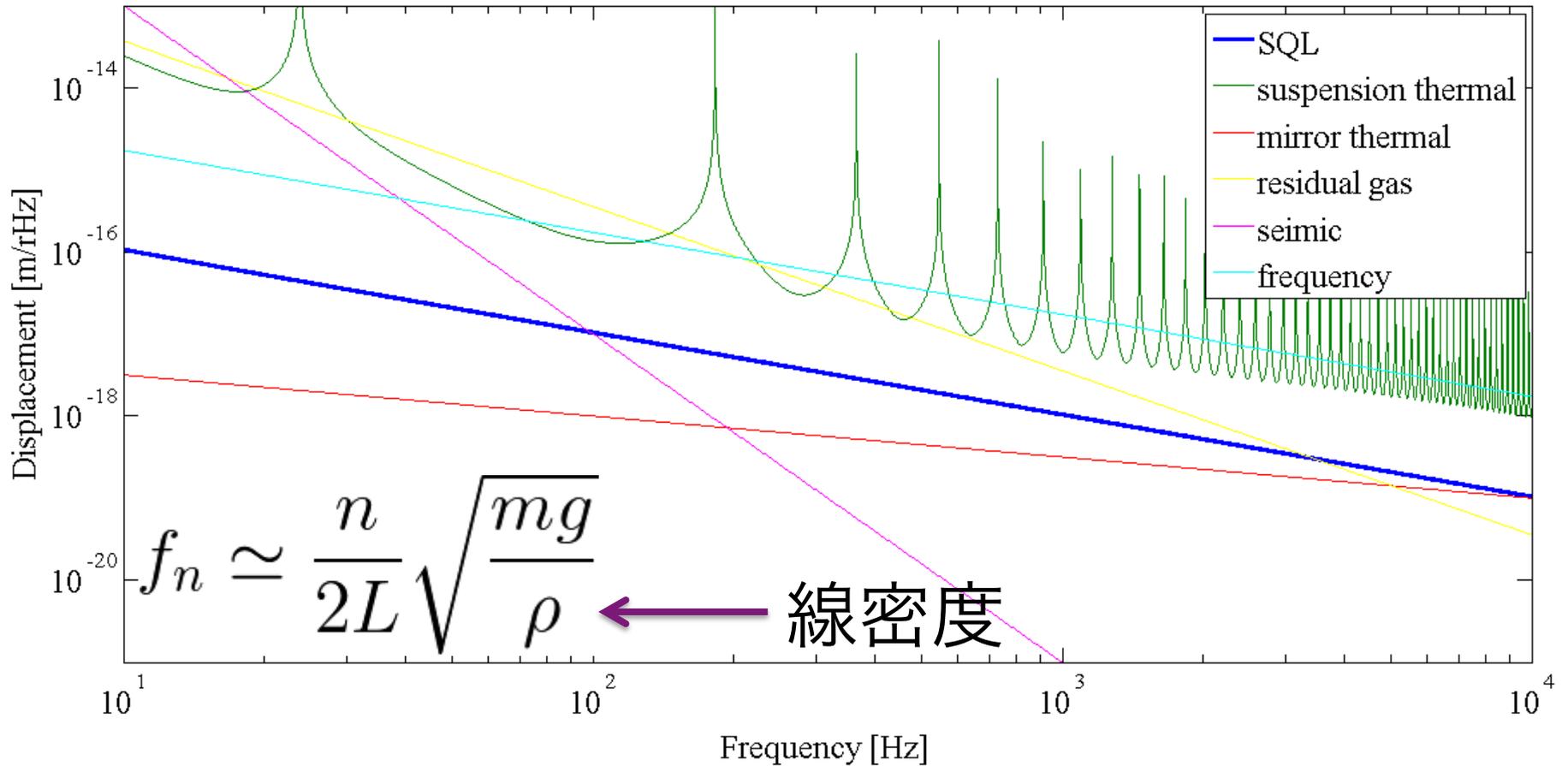
# エラー信号



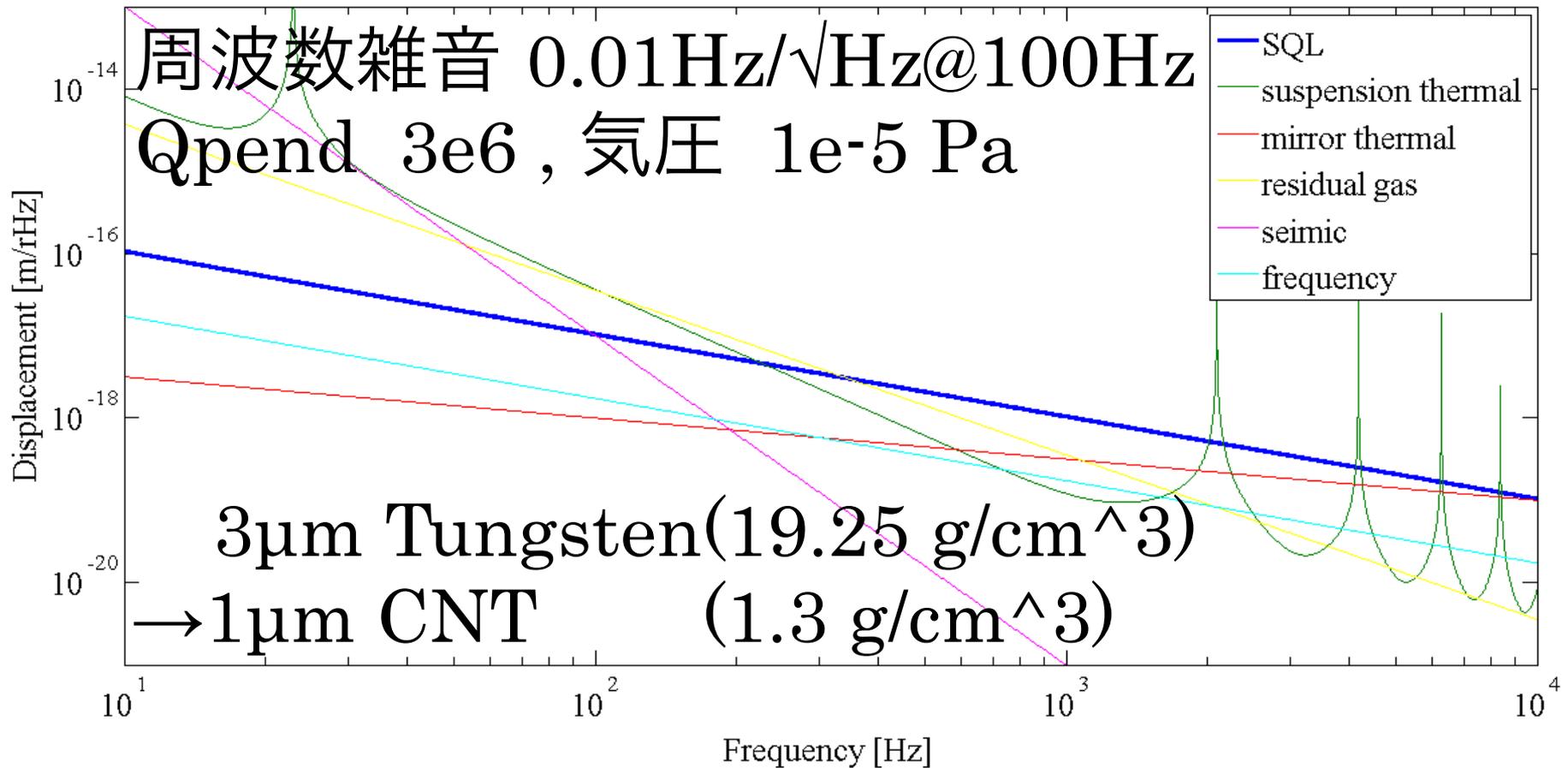
# 雑音源



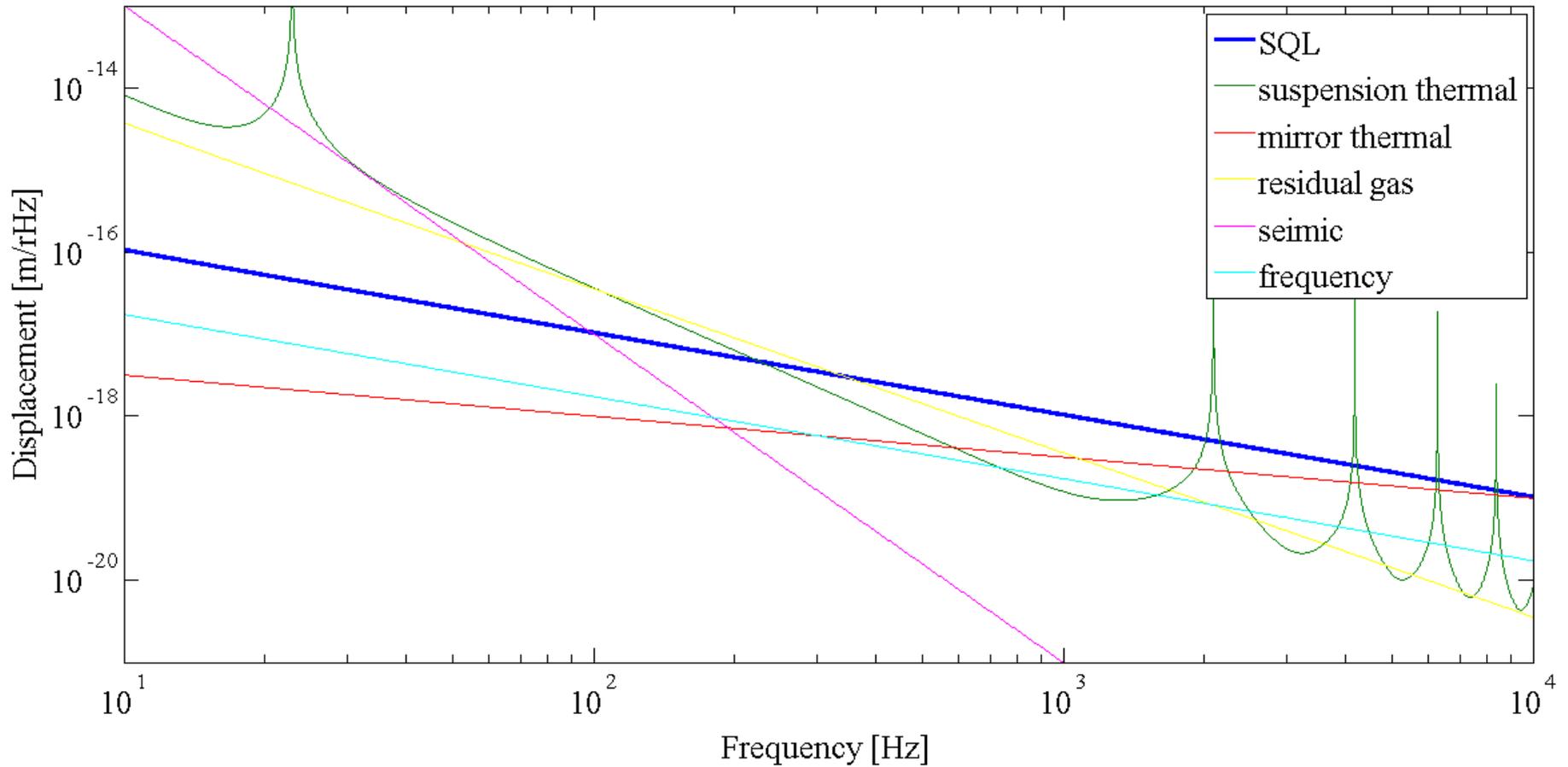
# SQL window



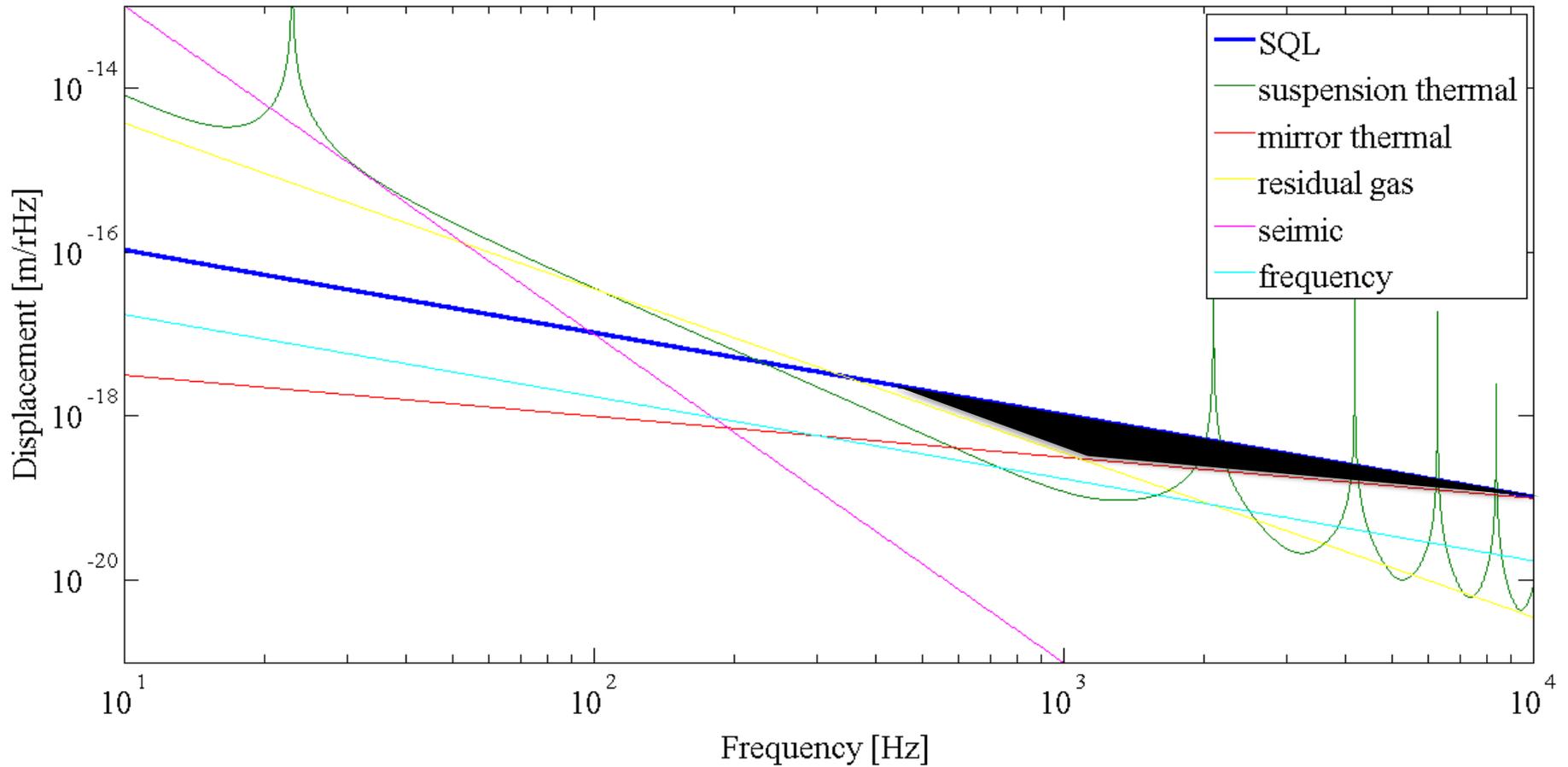
# SQL window



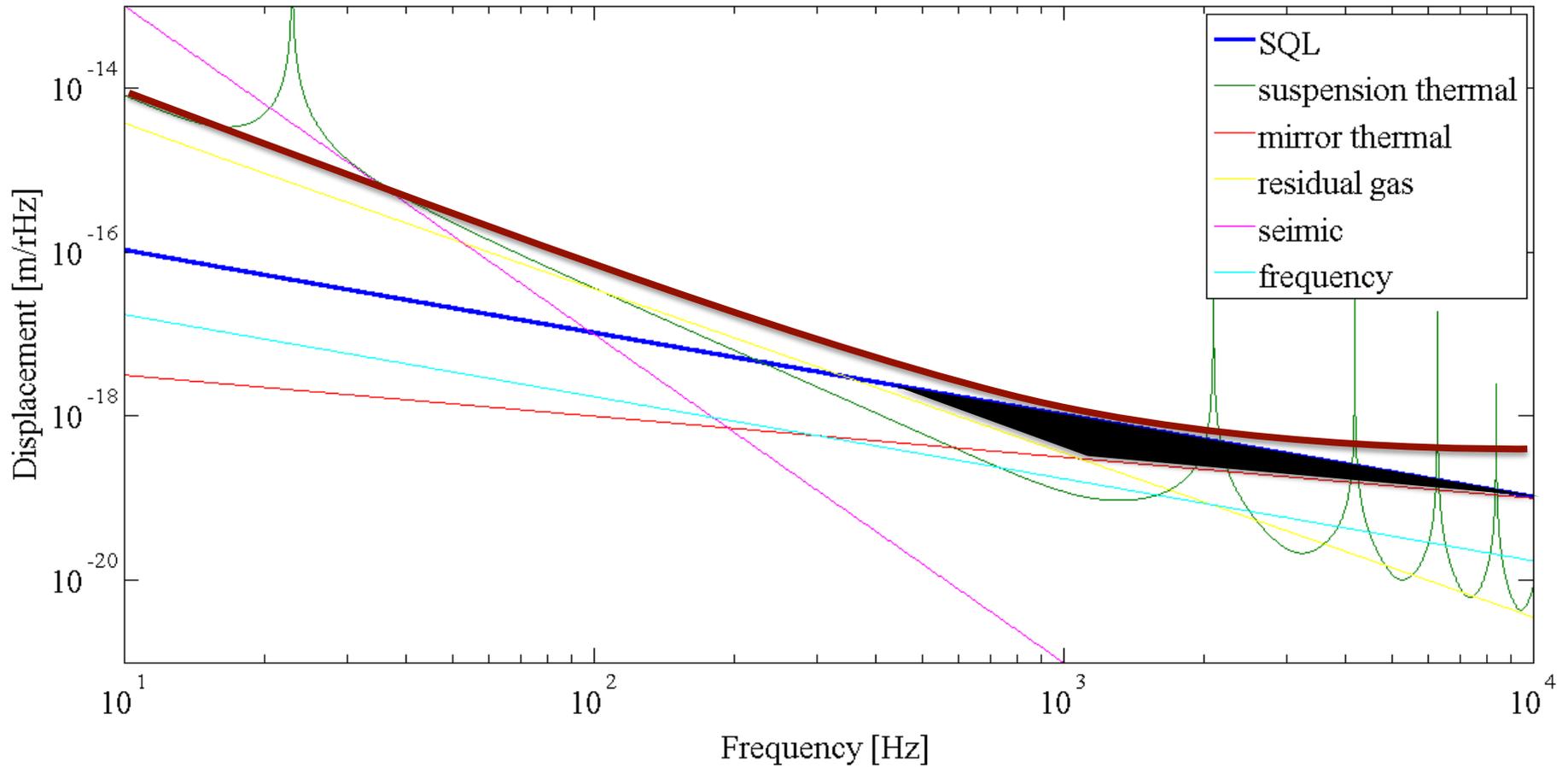
# SQL window



# SQL window



# SQL window



# 重力デコヒーレンスに向けて

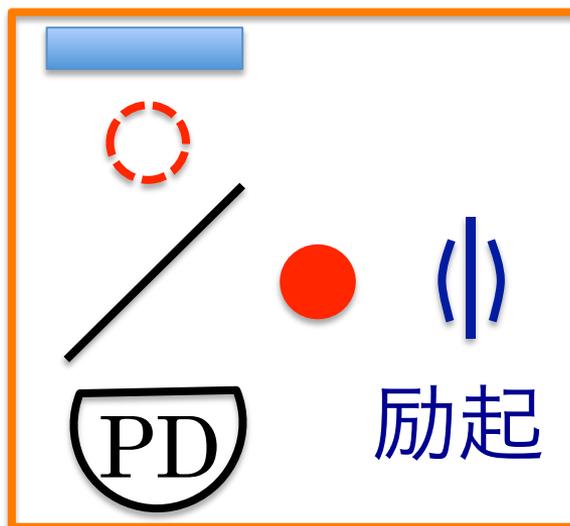
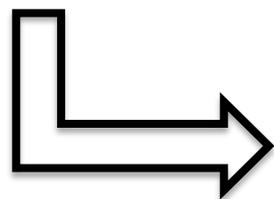
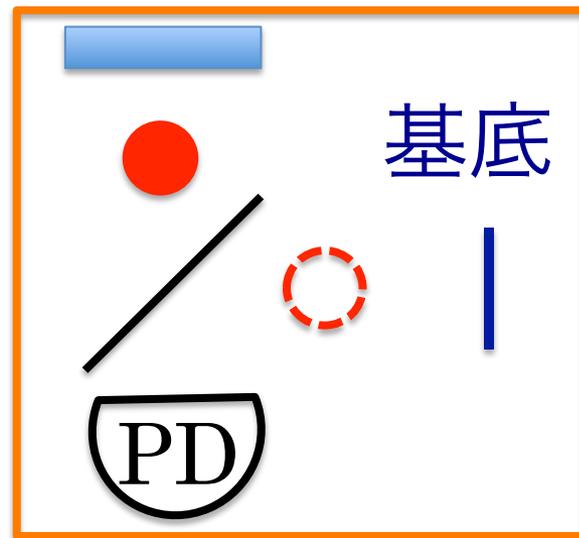
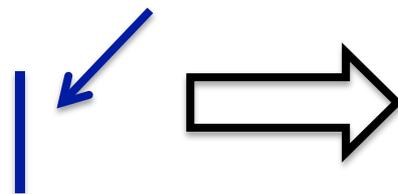
単一光子

光源



基底状態まで  
冷えた振動子

BS



重ね合わせ  
状態

W. Marshall *et. al.* PRL  
91,13(2003)

# Ground State Cooling

➤ Ground Stateとは

- ✓ 物体の最小エネルギー状態
- ✓ 絶対零度での振動
- ✓ phonon数が0

$$E = \hbar\omega_m \left( n + \frac{1}{2} \right)$$

$$\overline{x_{zp}^2} = \frac{\hbar}{2m\omega_m} \longrightarrow \frac{\hbar}{m\omega_m}$$

で規格化

つまり

$$n = \frac{\overline{x_{meas}^2}}{\frac{\hbar}{m\omega_m}} - \frac{1}{2}$$

< 1 でGround State  
(慣習的)

# Thermal Phonon

$$\overline{x_{th}^2} = \frac{k_B T}{m \omega_m^2} \quad \text{ブラウン運動による2乗平均}$$

$$n_{th} = \frac{\frac{k_B T}{m \omega_m^2}}{\frac{\hbar}{m \omega_m}} = \frac{k_B T}{\hbar \omega_m} \quad \text{熱的phonon数}$$

$$S_{th} = 4k_B T \gamma_m m \quad \text{@共振}$$

$$S_{SQL} = 2\hbar |\chi(\omega)| + 2\hbar \omega_m \gamma_m m \rightarrow 4\hbar \omega_m \gamma_m m$$

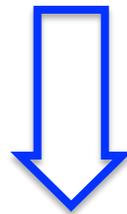
$$\frac{S_{th}}{S_{SQL}} \rightarrow \frac{k_B T}{\hbar \omega_m} = n_{th} \quad \text{熱雑音 < SQLが必要}$$

# Optomechanical Cooling

- optoとmechaを強くカップルさせ、新たな熱雑音を導入せずmechaの感受率だけを変える。

$$n_{min} \sim \left( \frac{\kappa}{\omega_m} \right)^2$$

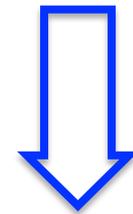
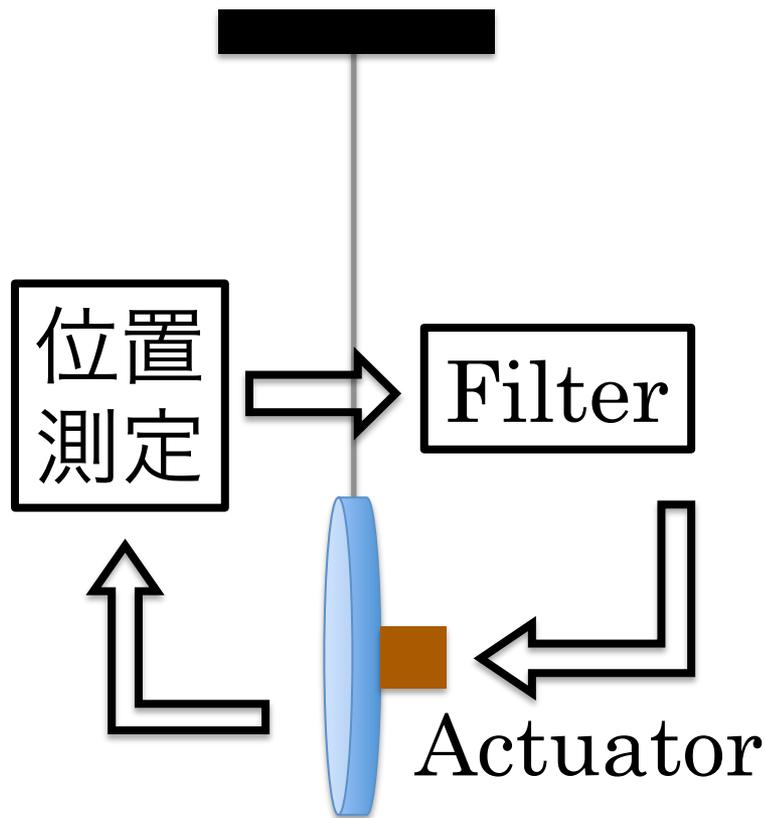
Bad cavity condition  
(線幅  $\gg$  共振周波数)  
ではphonon数大



**Feedback Cooling !**

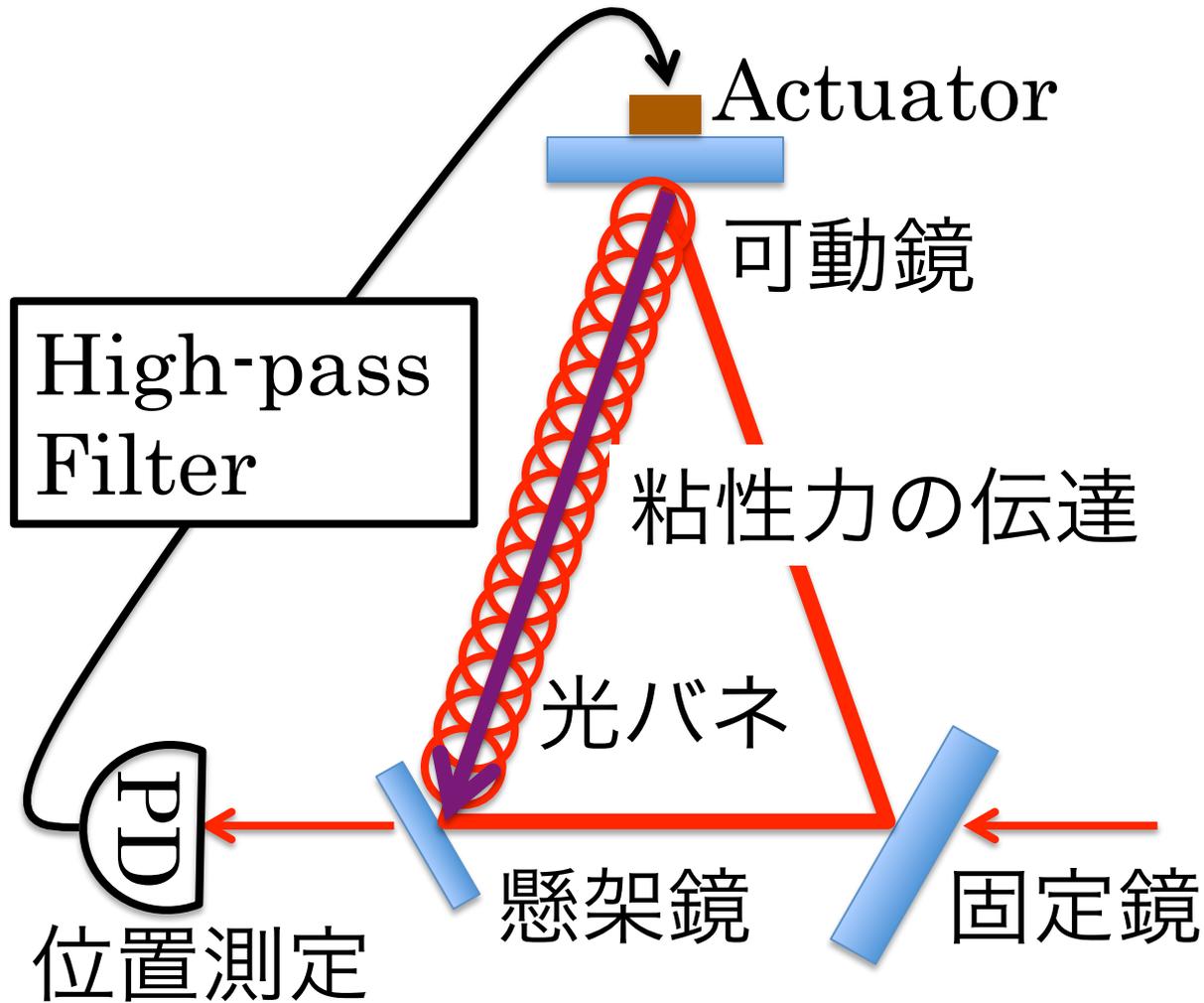
# Feedback Cooling

欠点：Actuator取り付け  
による新たな熱雑音の  
導入



Remote Cooling !

# Remote Cooling



# Quantum Langevin Equation

$$-i\omega\delta q_1 = \omega_1\delta p_1$$

$$-i\omega\delta p_1 = -\omega_1\delta q_1 - \gamma_1\delta p_1 + \underline{G_1\delta X} + \underline{\xi_1}$$

$$-i\omega\delta q_2 = \omega_2\delta p_2 \quad \text{Optical spring 熱雑音}$$

$$-i\omega\delta p_2 = -\omega_2\delta q_2 - \gamma_2\delta p_2 + \underline{G_2\delta X} + \underline{\xi_2}$$

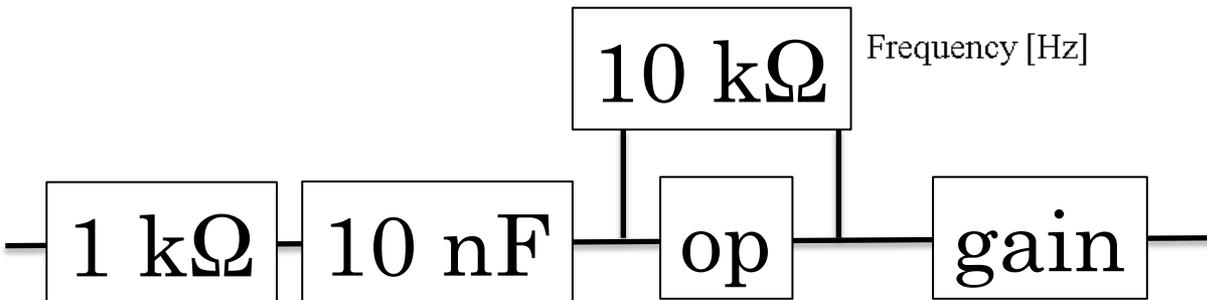
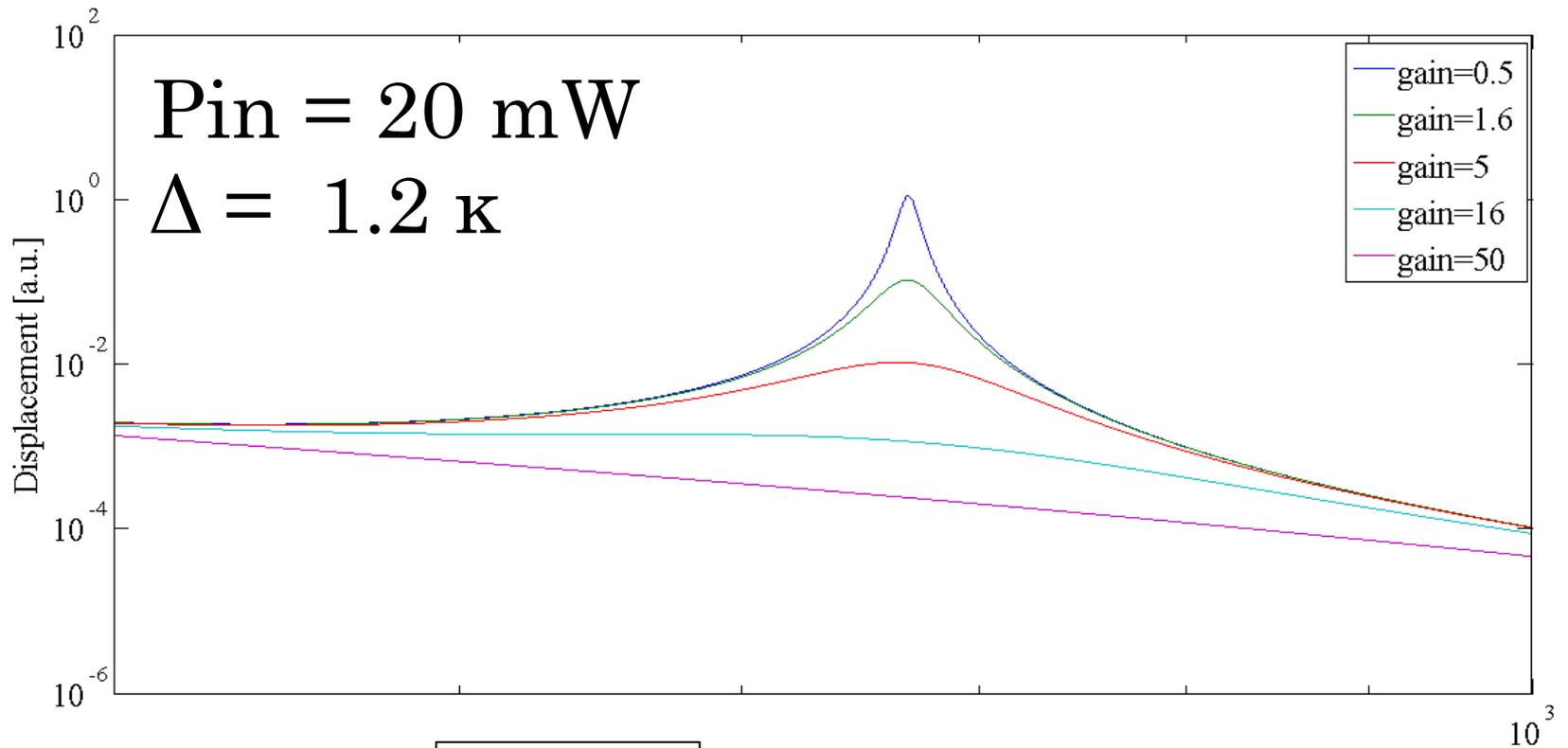
$$-\frac{g(\omega)}{\sqrt{\hbar m_2 \omega_2}} \left( \sqrt{\frac{\hbar}{m_1 \omega_1}} \delta q_1 + \sqrt{\frac{\hbar}{m_2 \omega_2}} \delta q_2 \right)$$

$$-i\omega\delta X = -\kappa\delta X + \Delta\delta Y + \sqrt{2\kappa}X^{in}$$

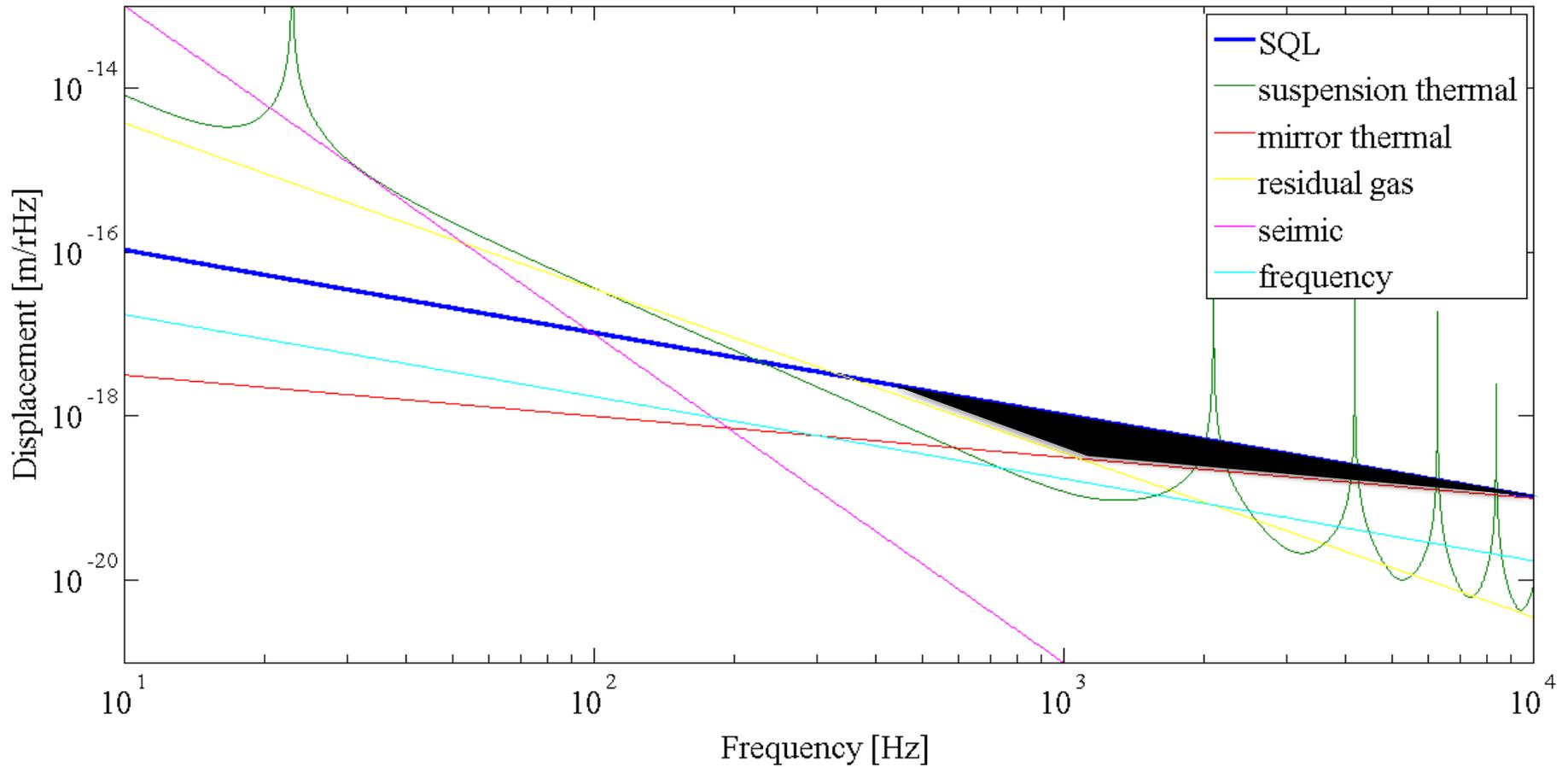
$$-i\omega\delta Y = -\kappa\delta Y - \Delta\delta X + G_1\delta q_1 + G_2\delta q_2 + \sqrt{2\kappa}X^{in}$$

位置測定をFeedback

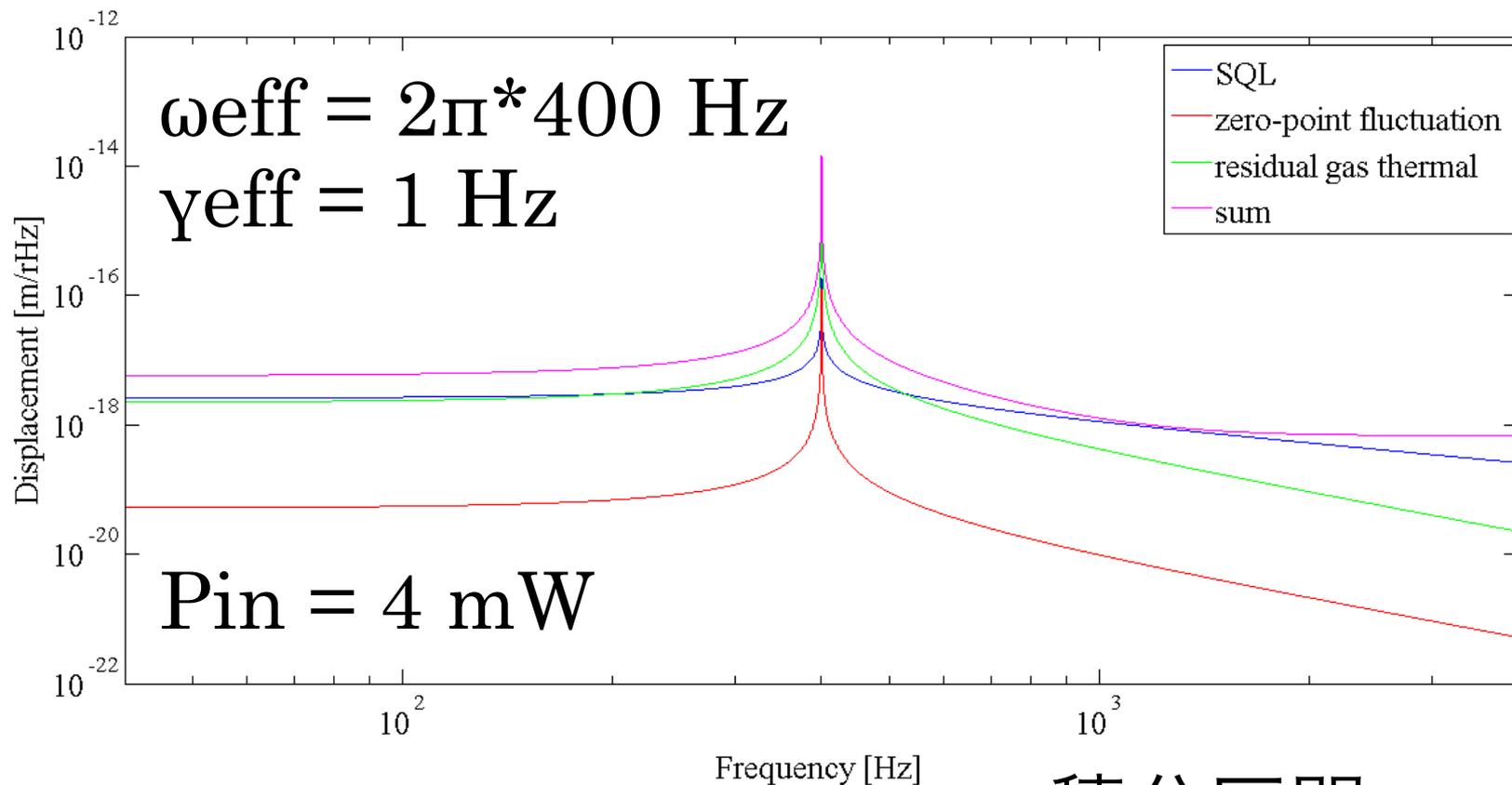
# Feedback Gain



# SQL window

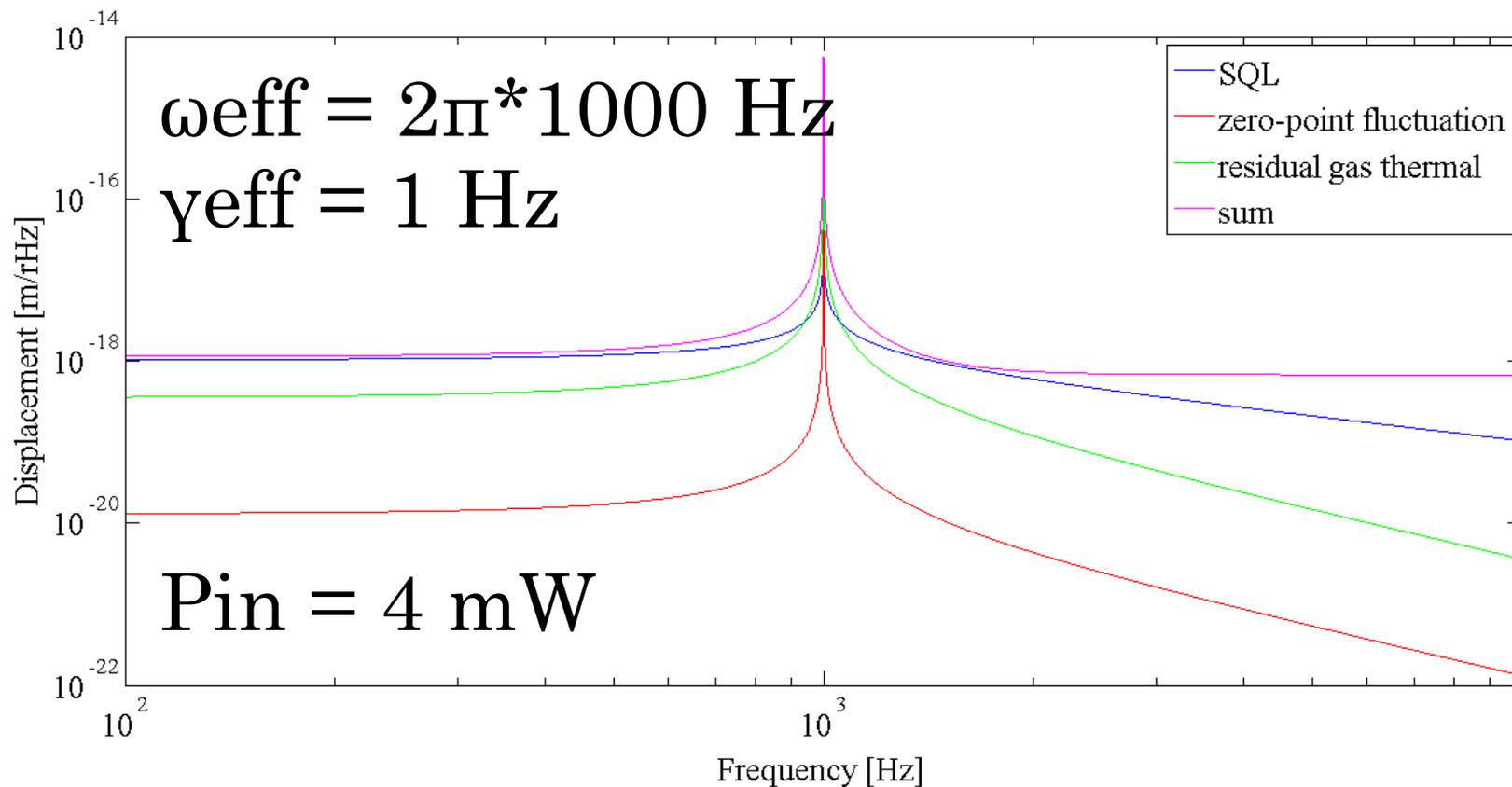


# 簡単なシミュレーション



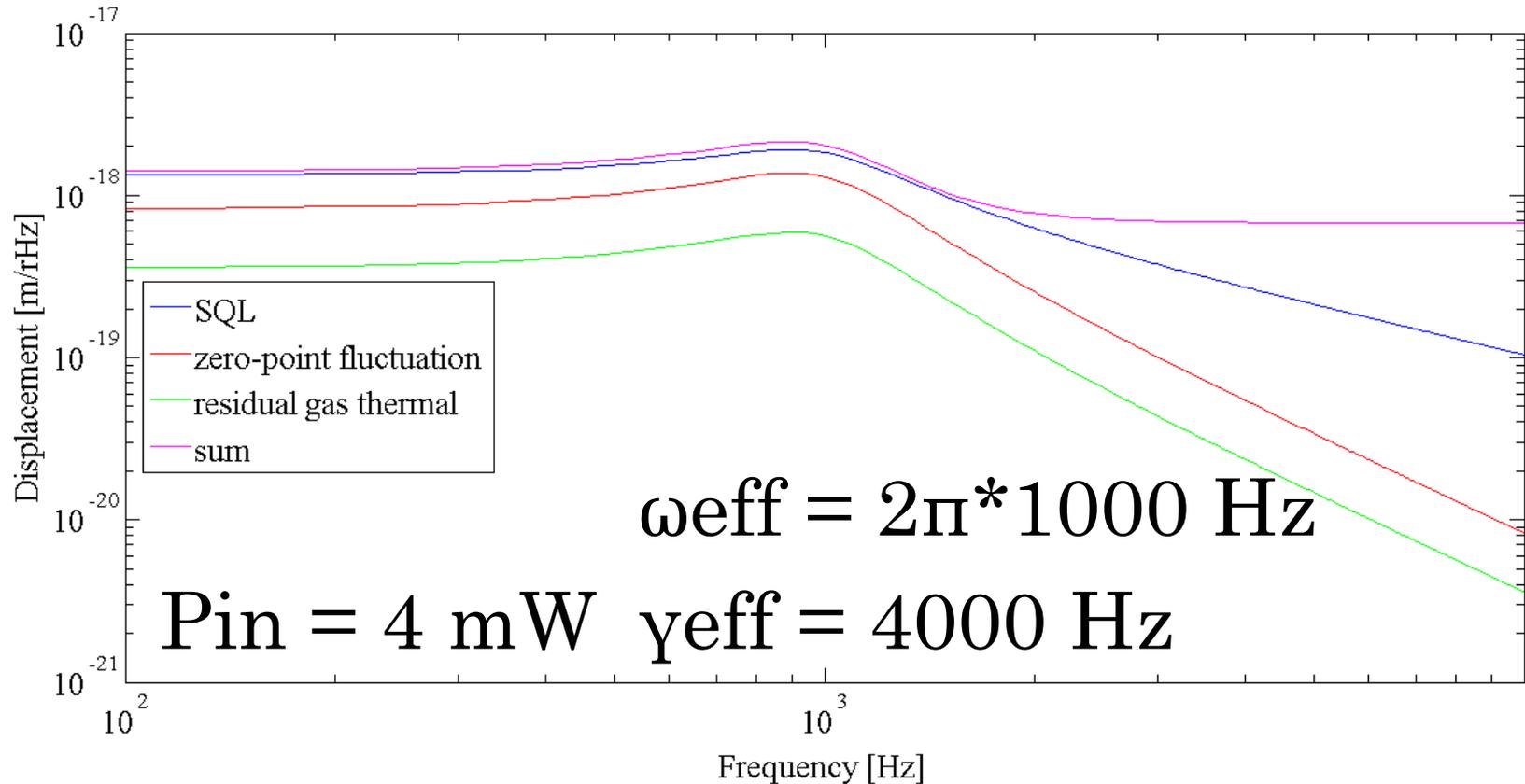
積分区間：  
 $n = 6100$  共振の1桁下から  
共振の2倍まで

# 簡単なシミュレーション



$n = 2400$

# 簡単なシミュレーション



$$n = 0.81$$

# まとめ、やりたいこと

- Quantum back action > suspension thermal は達成したが、SQLにはまだ遠い。
- 同相雑音除去、真空度上げはもちろんのこと、violin modeが効くなら1 $\mu$ m CNTは必須。
- Double optical springによるphonon数の最小値計算したい。
- ロックレスロックの仕組みを解決したい。
- Remote Cooling計算ダブルチェッカー求む。
- 今の地下のセットアップでも、remote cooling 原理検証なら可能なのでやりたい。
- “bad cavity”の可能性を広げたい。