

光学浮上実験 今後の方針

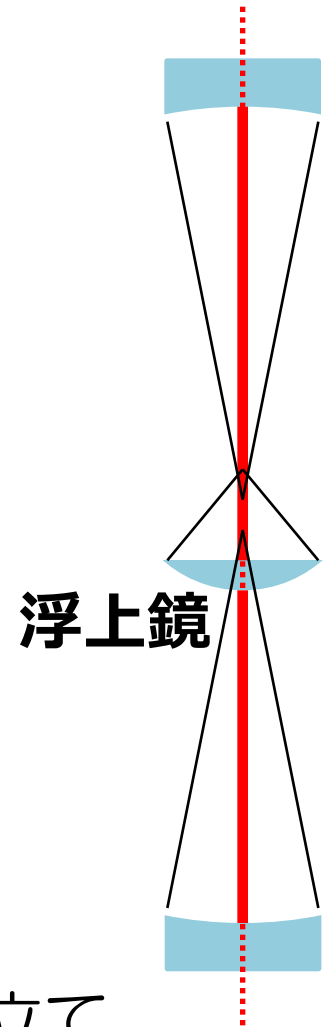
道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

安東研究室 博士課程3年

光学浮上実験ここまでの流れ

- 2013年11月13日 輪講で発表([資料](#))
サンドイッチ構造の発見
20Wレーザー程度で「感度を出す」設計
- 2013年11月 装置再設計
2Wレーザーで「浮上実証」を第一目標
- 2014年1月 浮上鏡の発注(4月納品)
 $\phi=3\text{ mm}$ 、 $t=0.1\text{ mm}$ 、 $\text{RoC}=30\text{ mm}$ 、
 $R>99.95\text{ \%}@1064\text{ nm}$ ($\sim 1.6\text{ mg}$)
- 2014年3月 牛場くんによる安定性再計算
道村計算と結果一致だがより簡単な表式
2次の効果はまだ
- 2014年3月28日 日本物理学会発表([資料](#))
感度設計の困難性
- 2014年4月 新真空ポンプ導入、真空系組み立て

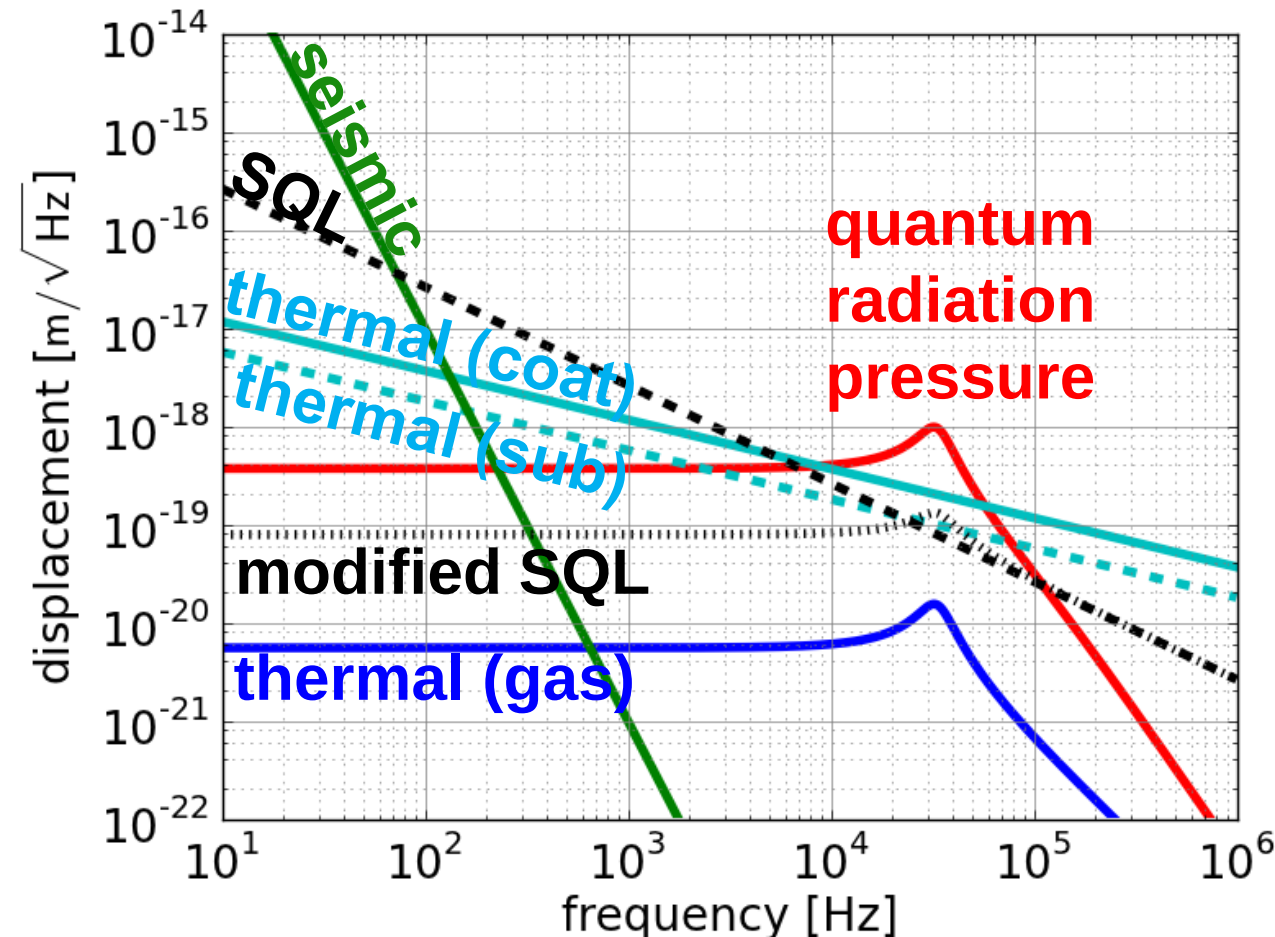


今後の方針

- 安定性計算と感度設計 (～6月)
 - 2次の効果(光ばね、ミスアラインメント)を入れて初期アラインメント/外乱への要求値
 - 共振周波数以下でSQLを超える感度設計
- 浮上鏡の品質チェック (～6月)
 - 納品は4月23日予定 (8枚発注で25枚作って形になったのは7枚らしい)
 - 反射率、曲率、質量測定
 - 実証実験の設計
- まずは浮上実証実験を行う (～来年夏?)
 - サンドイッチ構造
 - 光源は2 W NPRO
 - FI、EOM、AOMなどは松本さんと共有
 - ファイバで真空槽導入
 - ベルジャー真空槽
 - ピコモータ、コリメータなどで最大80万円程度必要₃

今回のお話

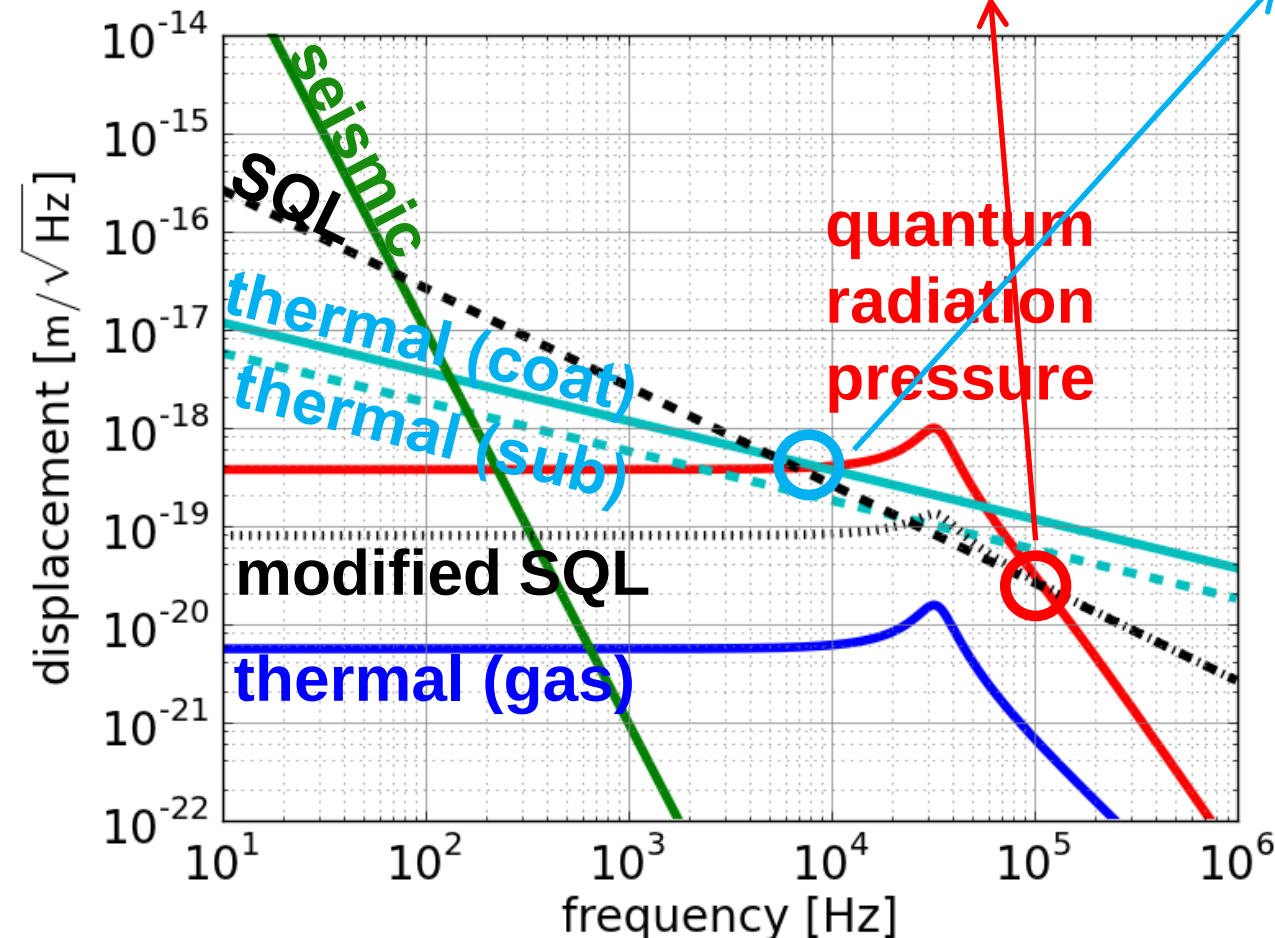
- 共振周波数以下でSQLを超える感度設計
SQL: 標準量子限界(standard quantum limit)
共振周波数以下で超えないと量子非破壊計測
とは言えない



SQLを超える条件

- 量子輻射圧雑音とSQLの交点周波数が、熱雑音とSQLの交点周波数より低いこと

$$\omega_{\text{rad}} = \text{SQL} < \omega_{\text{th}} = \text{SQL}$$



量子輻射圧雑音とSQLの交点

- 量子輻射圧雑音
- susceptibility [m/N]

intra-cavity power [W]

laser frequency [rad/s]

$$\sqrt{S_{\text{rad}}} = |\chi_{\text{eff}}| \sqrt{\frac{8P_{\text{circ}}\hbar\omega_c}{Lc\kappa} \left[1 + \left(\frac{\omega + \Delta}{\kappa} \right)^2 \right]^{-1}}$$

cavity length [m]
(one-way)

amplitude decay rate [rad/s]
(cavity pole)

detune [rad/s]

- SQL

$$\sqrt{S_{\text{SQL}}} = \sqrt{4\hbar|\chi_{\text{eff}}|}$$

$$\kappa = \frac{\pi c}{2L\mathcal{F}}$$

finesse

量子輻射圧雑音とSQLの交点

- 共振より高く、cavity poleより低い周波数帯では
($\omega_{\text{eff}} \ll \omega \ll \kappa$ かつ $\Delta \ll \kappa$)

$$\sqrt{S_{\text{rad}}} \simeq \frac{1}{m\omega^2} \sqrt{\frac{8P_{\text{circ}}\hbar\omega_c}{L\kappa}} \quad \sqrt{S_{\text{SQL}}} \simeq \sqrt{\frac{4\hbar}{m\omega^2}}$$

- よって量子輻射圧雑音とSQLとの交点周波数は

$$\omega_{\text{rad=SQL}} \simeq \sqrt{\frac{2P_{\text{circ}}\omega_c}{mL\kappa}} \simeq \sqrt{\frac{\omega_c g_G}{L\kappa}} \quad \text{鏡の質量に依存しない!}$$

- 光学浮上での力のつり合いを用いた

$$\frac{2P_{\text{circ}}}{c} \simeq mg_G \quad \text{gravitational acceleration [m/s}^2\text{]}$$

熱雑音とSQLの交点

- コーティング熱雑音

$$\sqrt{S_{\text{coat}}} = \sqrt{\frac{k_B T}{Q_{\text{co}} \omega} \frac{2d_{\text{co}}(1 + \sigma_{\text{co}})(1 - 2\sigma_{\text{co}})^2}{\pi w^2 E_{\text{co}}(1 - \sigma_{\text{co}})}}$$

thickness [m] (points to d_{co})
 beam radius [m] (points to w)
 Young's modulus [Pa] (points to E_{co})
 poisson ratio (points to σ_{co})
 鏡2枚分はこの $\sqrt{2}$ 倍 (points to the entire formula)

- SQL

$$\sqrt{S_{\text{SQL}}} = \sqrt{4\hbar|\chi_{\text{eff}}|} \simeq \sqrt{\frac{4\hbar}{m\omega^2}} \quad (\omega_{\text{eff}} \ll \omega)$$

- コーティング熱雑音とSQLの交点周波数は

$$\omega_{\text{th=SQL}} = \frac{\hbar}{mk_B T} \frac{\pi w^2 Q_{\text{co}} E_{\text{co}}(1 - \sigma_{\text{co}})}{d_{\text{co}}(1 + \sigma_{\text{co}})(1 - 2\sigma_{\text{co}})^2}$$

SQLを超える条件

- $\omega_{\text{rad}}=\text{SQL} < \omega_{\text{th}}=\text{SQL}$ が条件なので

$$\sqrt{\frac{\omega_c g_G}{L\kappa}} < \frac{\hbar}{mk_B T} \frac{\pi w^2 Q_{\text{co}} E_{\text{co}} (1 - \sigma_{\text{co}})}{d_{\text{co}} (1 + \sigma_{\text{co}}) (1 - 2\sigma_{\text{co}})^2}$$

- つまり

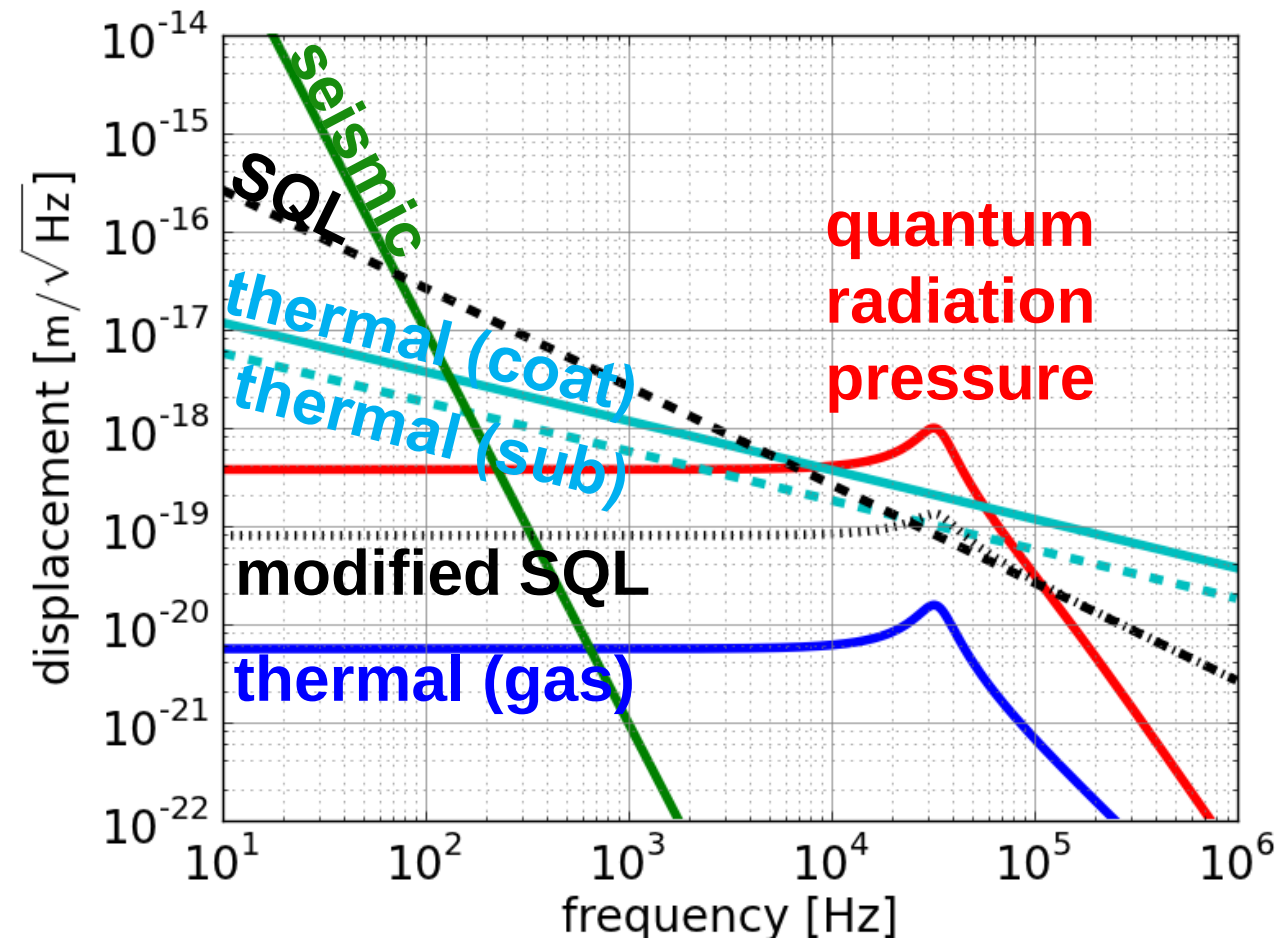
$$\sqrt{\mathcal{F}} m < \sqrt{\frac{\pi c}{2\omega_c g_G}} \frac{\hbar}{k_B T} \frac{\pi w^2 Q_{\text{co}} E_{\text{co}} (1 - \sigma_{\text{co}})}{d_{\text{co}} (1 + \sigma_{\text{co}}) (1 - 2\sigma_{\text{co}})^2}$$

1.77e15 rad/s 0.1 mm 2500 80 GPa 0.17
8 um?

$$\sqrt{\mathcal{F}} m < 8.2 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

最初の設計感度

- フィネス $F = 1.6 \times 10^4$ 、鏡の質量 $m = 1.6 \text{ mg}$
 $\sqrt{F}m = 195 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad (> 8.2 \times 10^{-6} \text{ kg})$

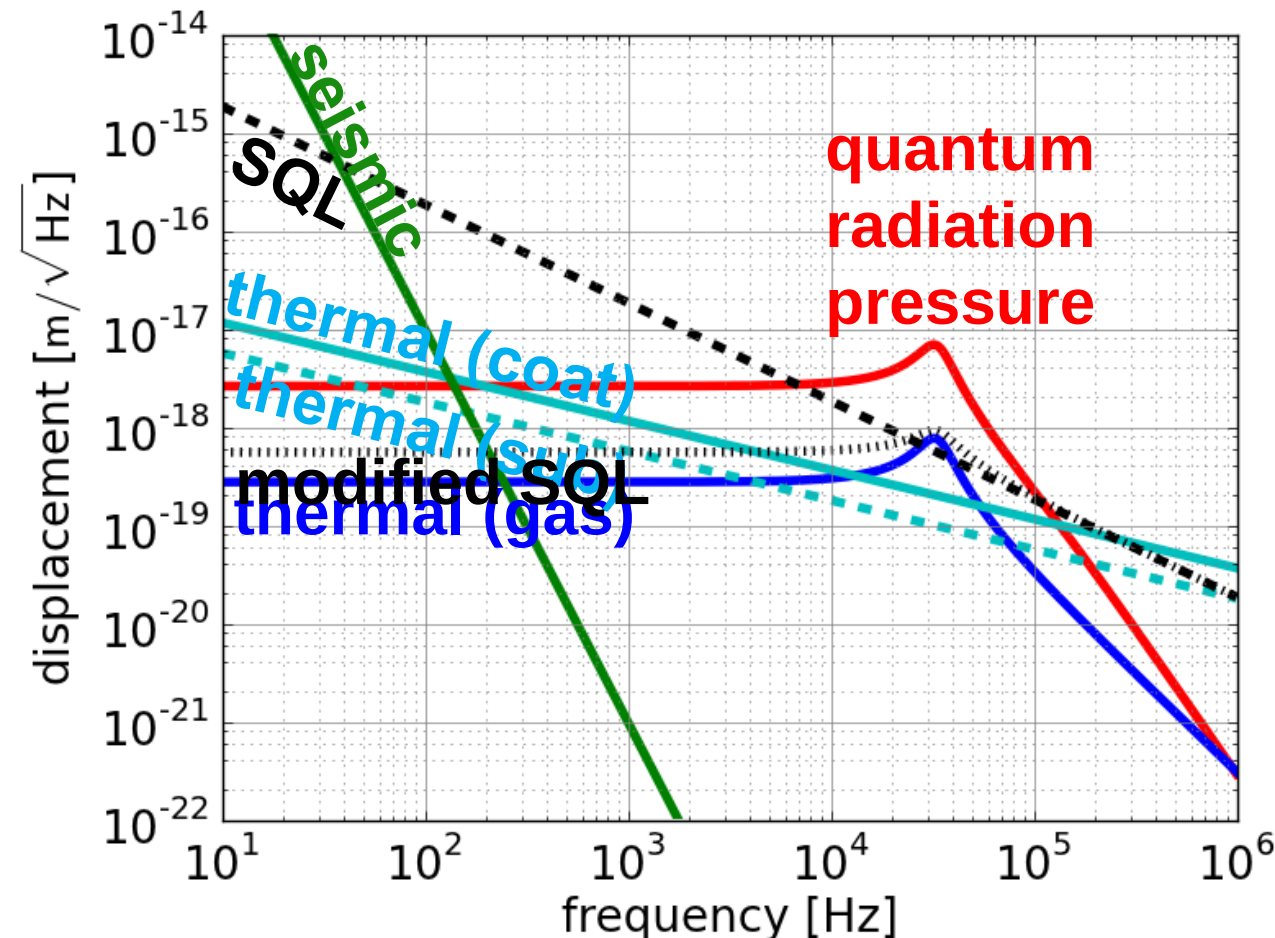


共振周波数以下でしかSQL超えられない

合計1W使用

質量を軽くする(1/50)

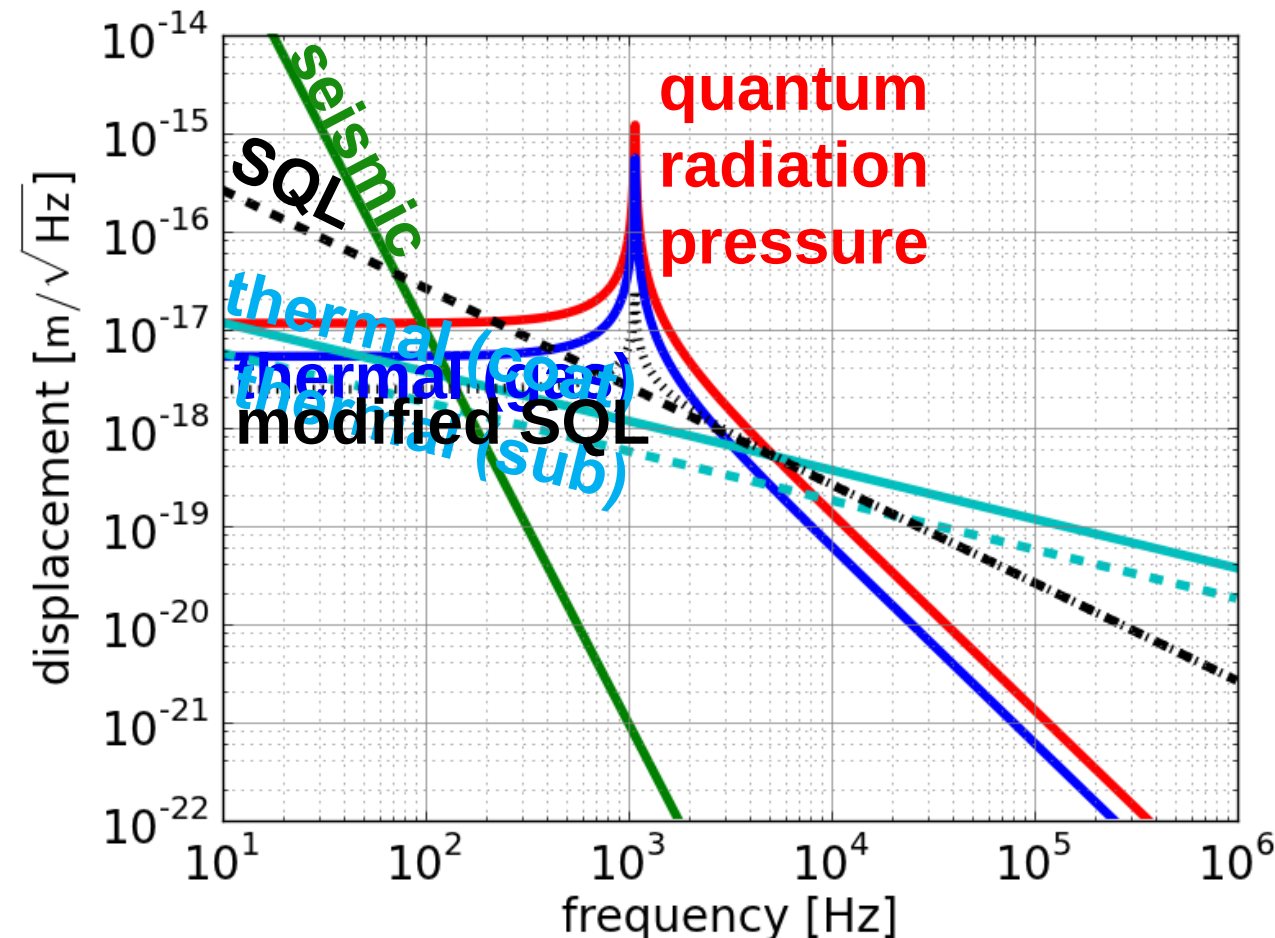
- フィネス $F = 1.6 \times 10^4$ 、鏡の質量 $m = 0.03 \text{ mg}$
 $\sqrt{F}m = 3.9 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad (< 8.2 \times 10^{-6} \text{ kg})$



SQL超えられるが
超える周波数が高い
ので技術的に大変

フィネスを低くする(1/1000)

- フィネス $F = 16$ 、鏡の質量 $m = 1.6 \text{ mg}$
 $\sqrt{F}m = 6.1 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad (< 8.2 \times 10^{-6} \text{ kg})$



SQL超えられるが
1000W光源が必要

現実的な設計？

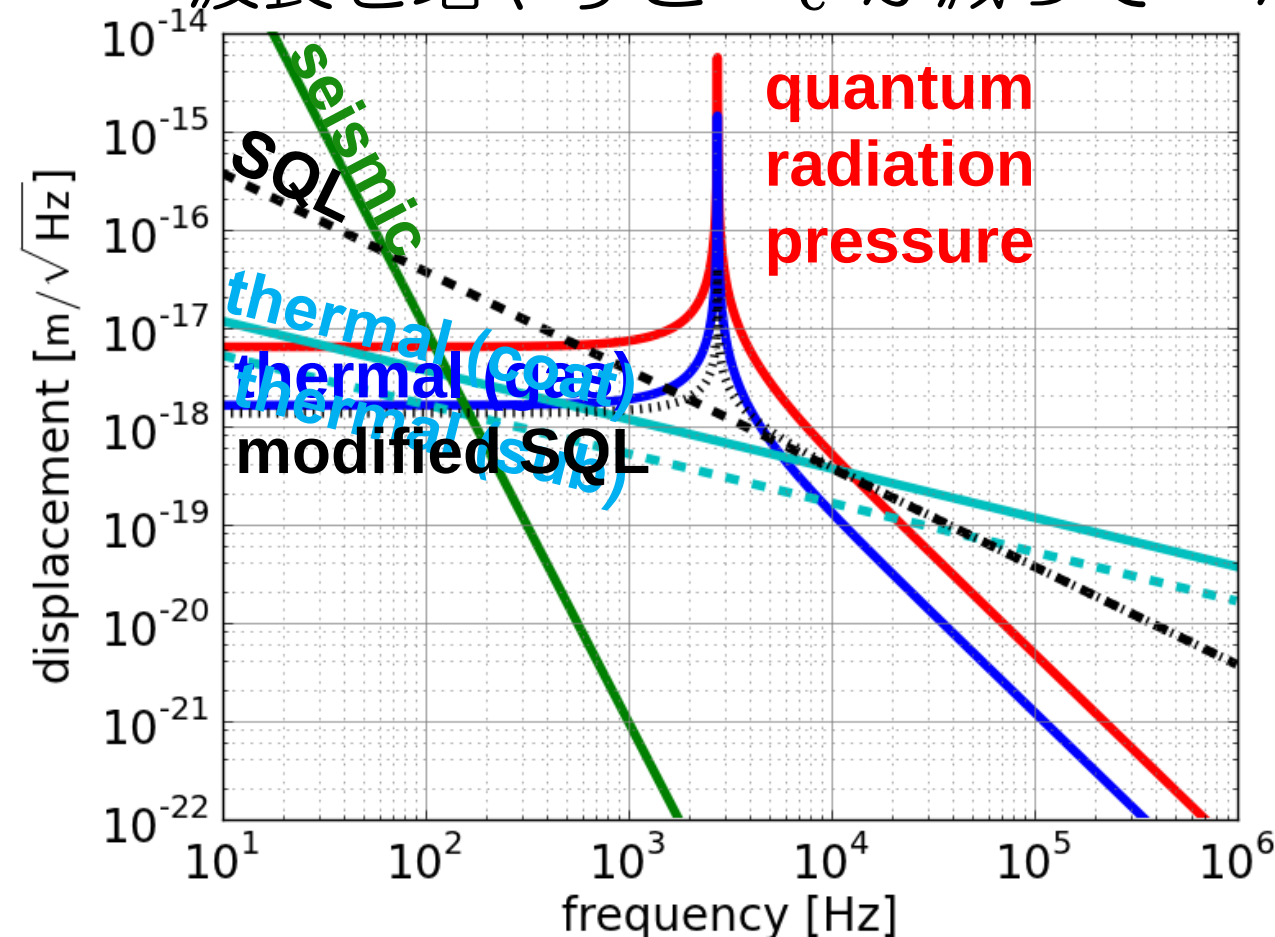
- 鏡の質量を半分の0.8mgに、フィネスは2桁下げて157に、50W光源に
- 波長を増やすと ω_c が減って w が増える
1064 nm → 1550 nm で約2倍得
- コーティングもっと攻められるはず

$$\sqrt{\mathcal{F}}m < \sqrt{\frac{\pi c}{2\omega_c g_G}} \frac{\hbar}{k_B T} \frac{\pi w^2 Q_{co} E_{co} (1 - \sigma_{co})}{d_{co} (1 + \sigma_{co}) (1 - 2\sigma_{co})^2}$$

0.1 mm → 0.15 mm (pink)
 2500 (red)
 80 GPa (red)
 0.17 (red)
 1.77e15 rad/s (red) → 1.22e15 rad/s (pink)
 8 um? (red) → 12 um? (blue)

現実的な設計？

- 鏡の質量を半分の0.8mgに、フィネスは2桁下げて157に、50W光源に
- 波長を増やすと ω_c が減って w が増える



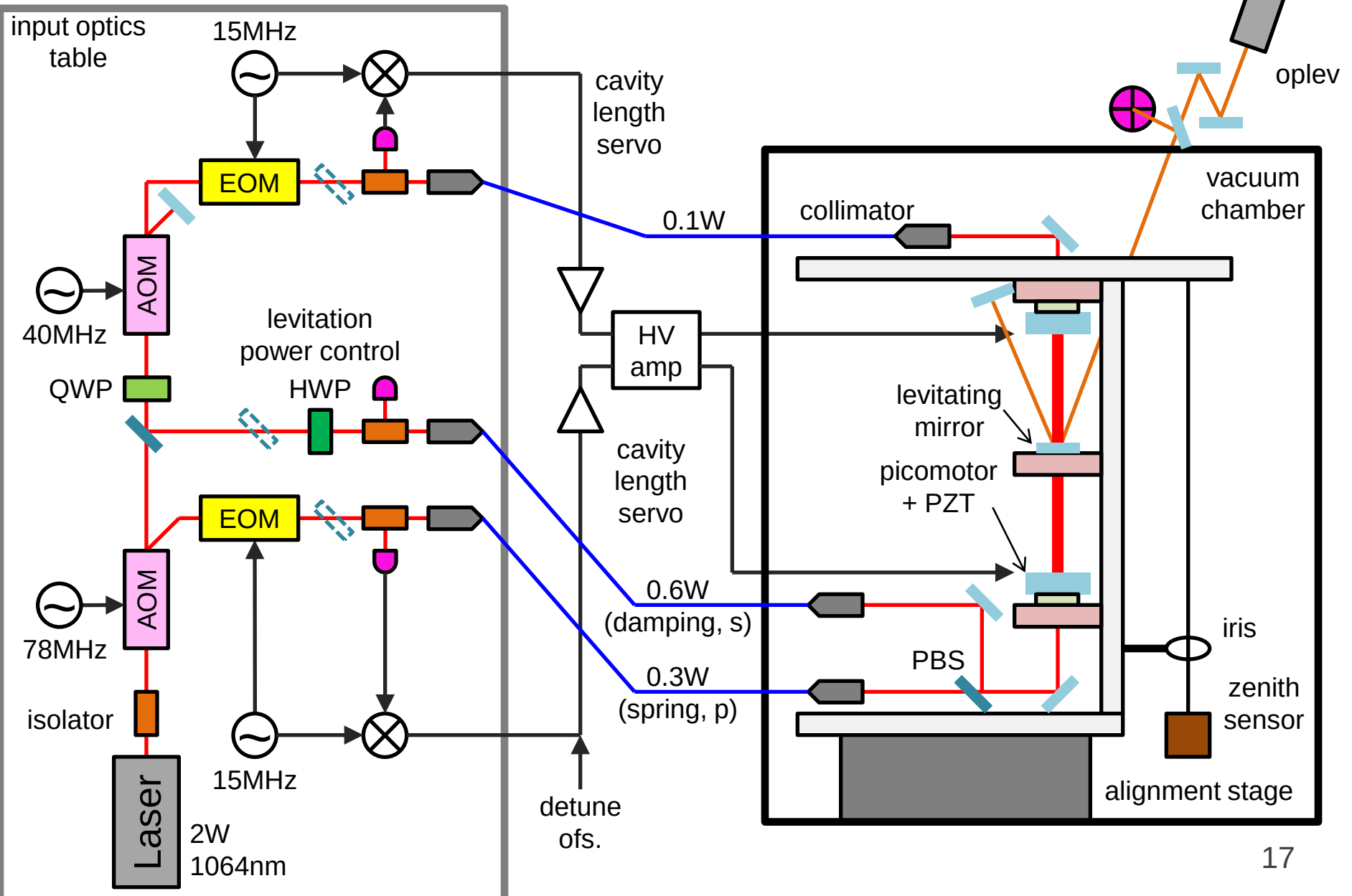
1064 nm
→ 1550 nm

その他の懸念事項、検討事項

- HR面側からとAR面側からの曲率中心の位置が違出し、その2つの曲率中心を結んだ線上に重心があるとは限らない
- 1 W近くの光をファイバに入れられるか
- 鉛直方向ではなく、回転方向を測定する可能性
光強度を自由に変えられる
- 低温化
radiative cooling

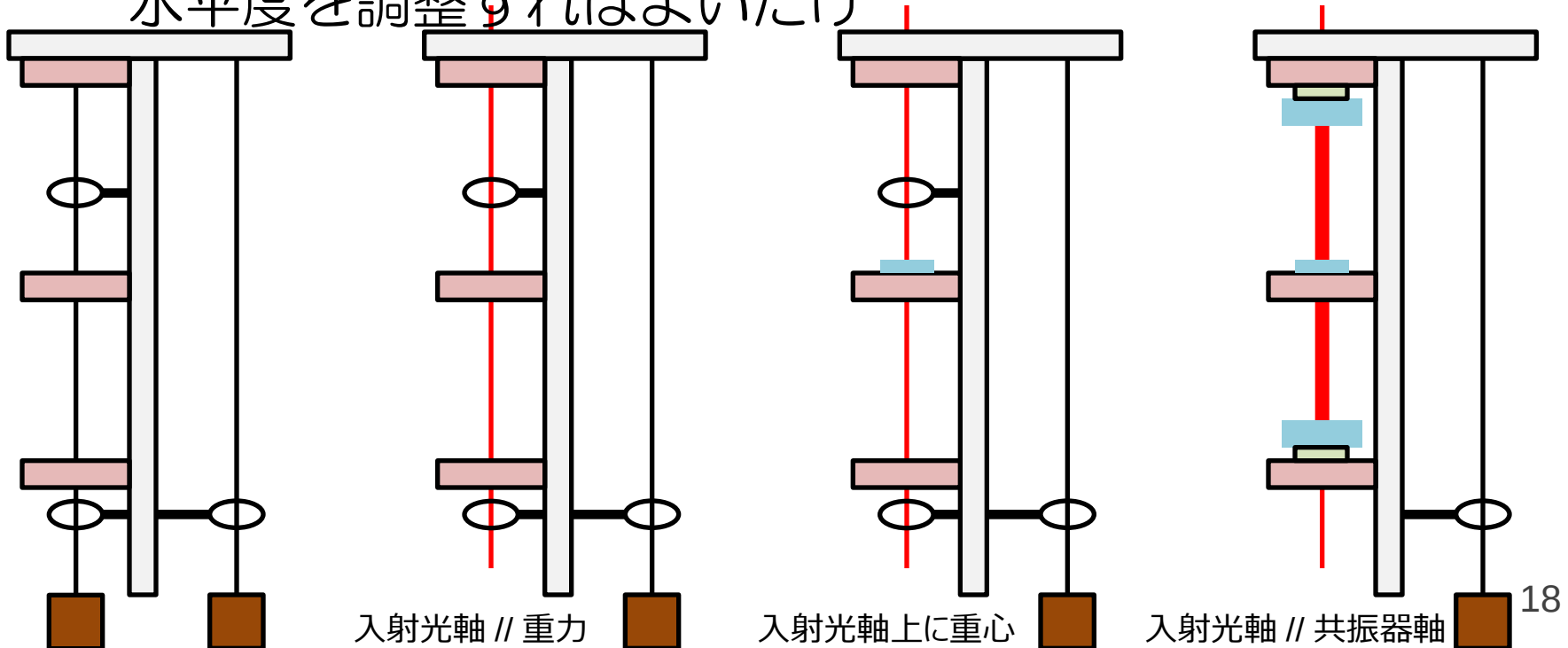
おまけ

実験装置全体図



アラインメント手順案

- 2つの錘を吊るした紐がアイリスを通るようにする
- アイリスに通るように上下の入射光軸をアライン
- 入射光が浮上鏡の中心(~重心)に当たるよう配置
- 上下共振器の共振が取れるように各鏡をアライン
- 移動させても、再び紐がアイリスを通るよう光学系全体の水平度を調整すればよいだけ



浮上手順案

- 浮上鏡の曲率をTMS測定などで事前に求めておく
- その上で共振器長を決める
- 十分にアラインメントをとる
- 上共振器の共振器長を制御
- 下共振器の共振器長をspring光で制御
- 下共振器へのdamping光を増やしていく
- 光てこで回転などの共振周波数を確認し、浮上を確認
- 浮上したらdamping光の光量増加を止める
- 失敗したら浮上鏡のアラインメントがずれる可能性がある
ので、浮上鏡のアラインメントやり直し