

鏡の光学浮上

道村唯太

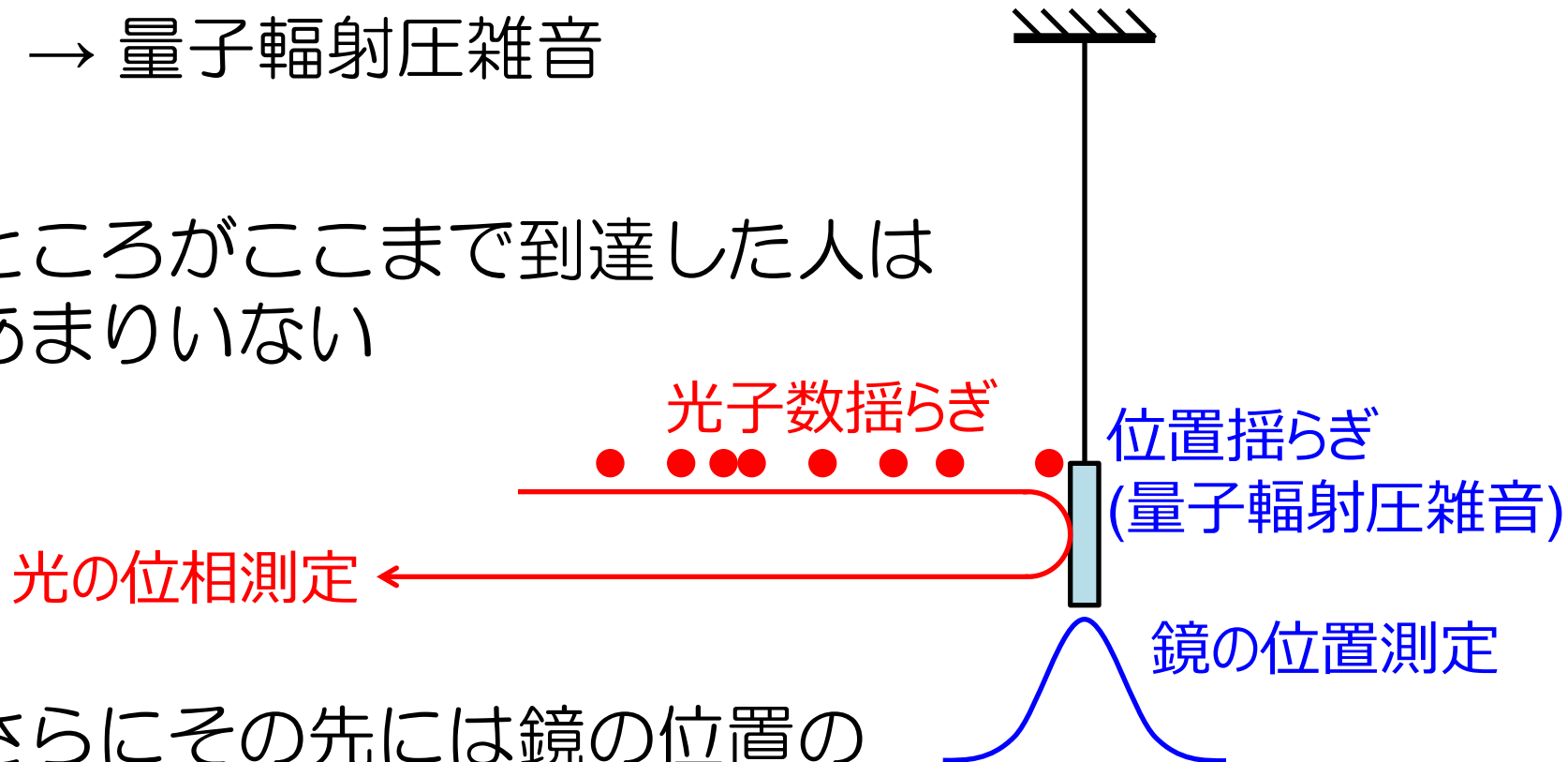
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

安東研究室

機械光学系における量子測定

- 超高精密測定における擾乱(quantum back-action)
- 重力波検出器のような機械光学系
光子数が揺らいで鏡の位置が揺らぐ
→ 量子輻射圧雑音

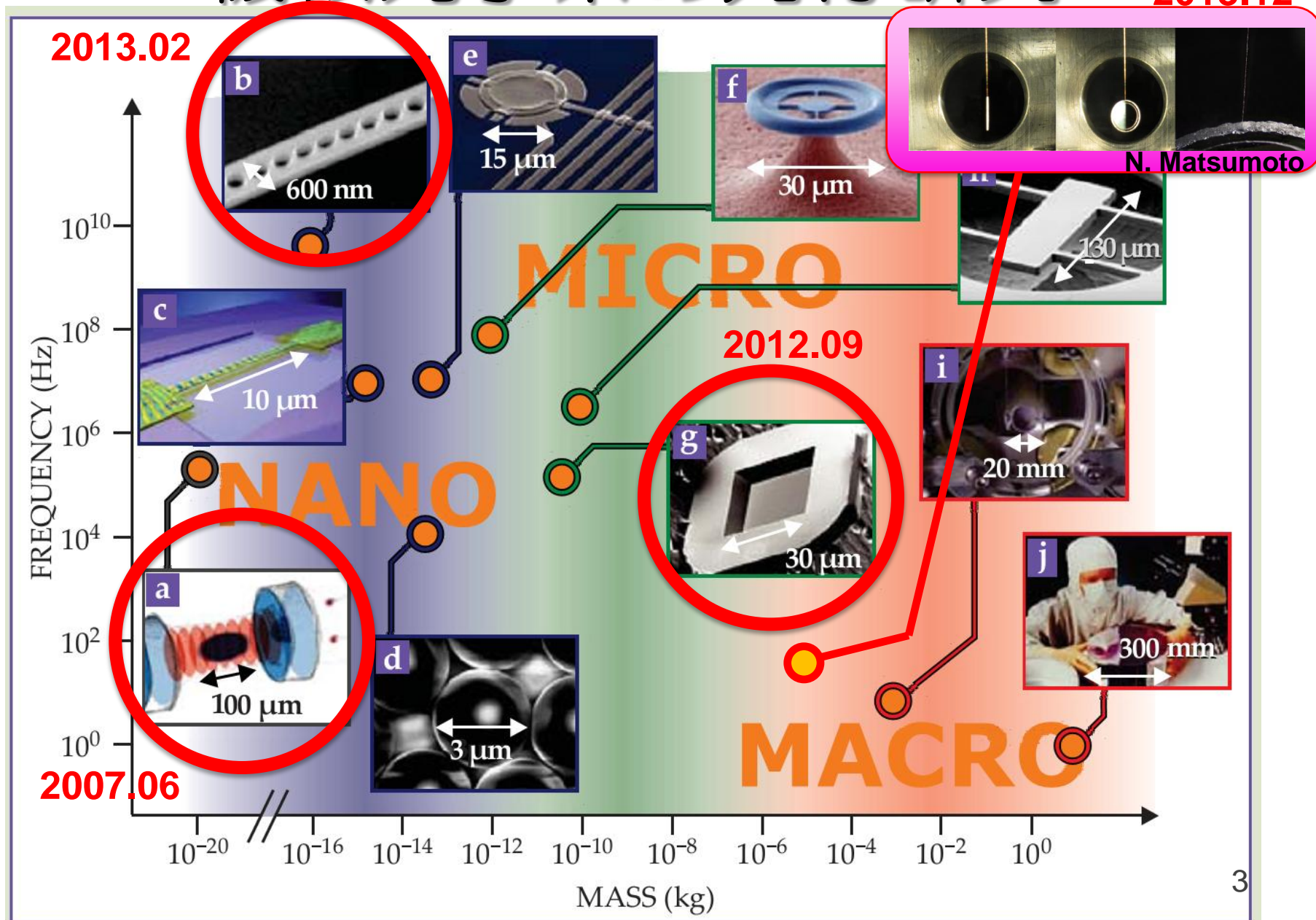
- ところがここまで到達した人はあまりいない



- さらにその先には鏡の位置の量子揺らぎ = 標準量子限界(SQL)

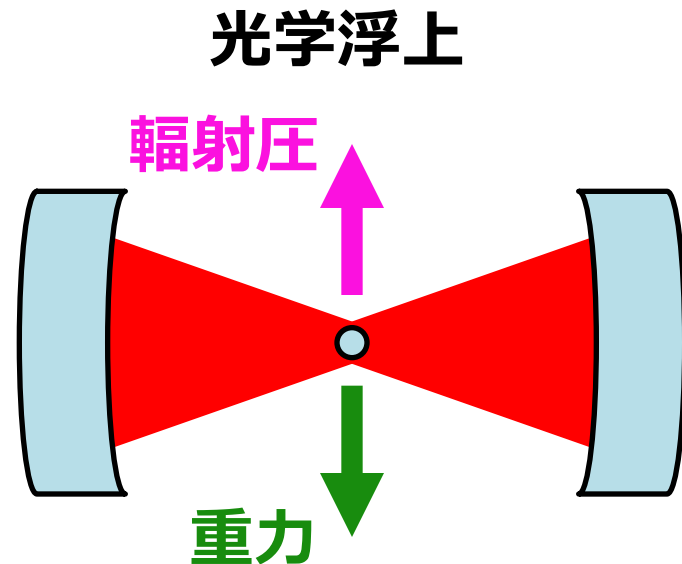
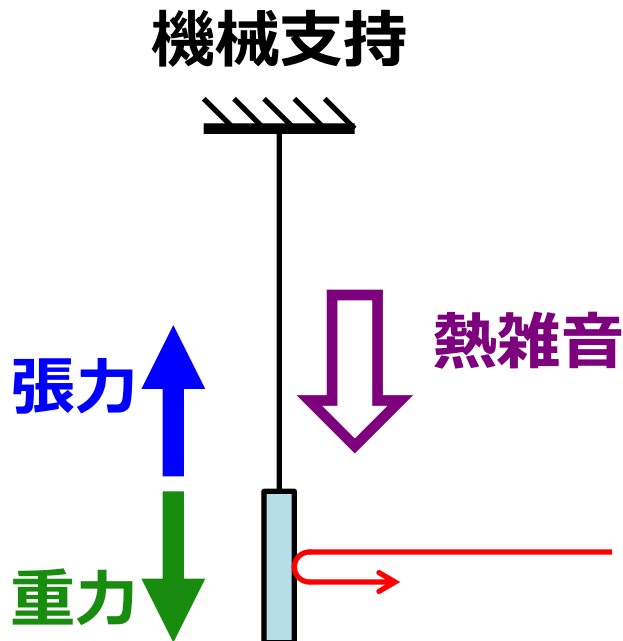
機械光学系の先行研究

2013.12



光学浮上

- 光輻射圧によって物体を捕捉する方法
- 機械的支持に伴う熱雑音がない
(e.g. サスペンション熱雑音やそのviolin mode)
→ 超高感度力センサ
量子力学、巨視的量子現象の研究 に使える

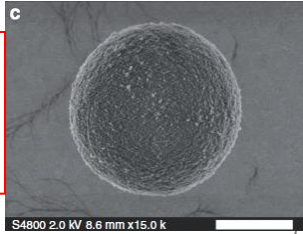


光学浮上の先行研究

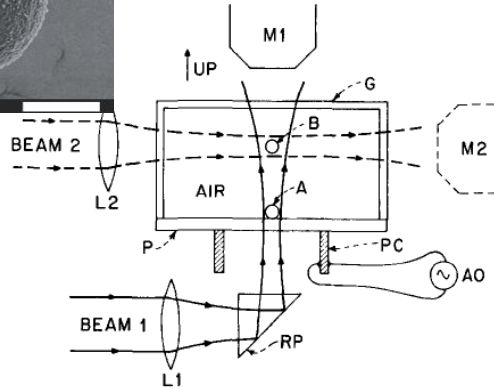
sensitivity(m/rHz)

Y. Arita+: [Nature Communications 4, 2374 \(2013\)](#)

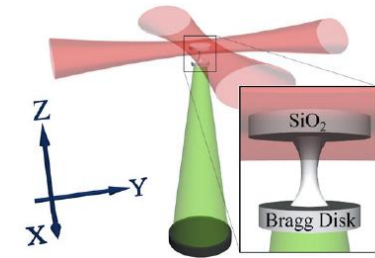
tweezer / 4.4 μ m / 0.1ng? / 40K, 1e-10 m/rHz, gyroscope



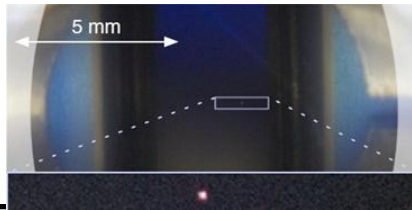
A. Ashkin+: [Appl. Phys. Lett. 19, 283 \(1971\)](#)
tweezer / 20 μ m / 10ng? / ?? m/rHz



S. Singh+: [PRL 105, 213602 \(2010\)](#)
cavity+tweezer / 60 μ m / 40ng / 1e-10m/rHz

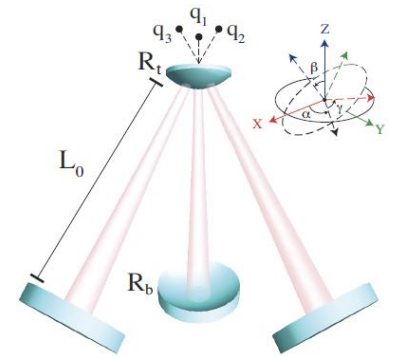


N. Kiesel+: [PNAS 110, 14180 \(2013\)](#)
cavity / 0.15 μ m / 10fg? / 64K, 4e-12 m/rHz

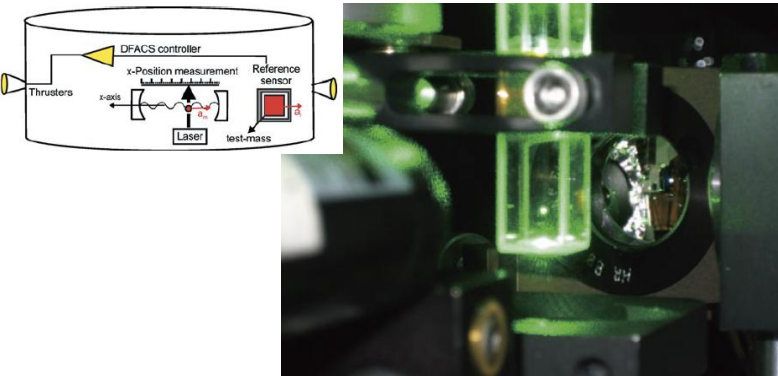
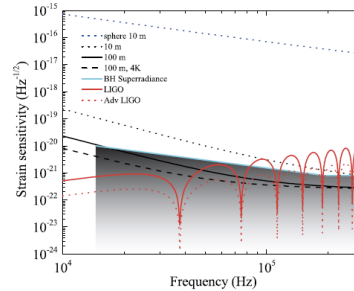


A. Arvanitaki, A. A. Geraci : [PRL 110, 071105 \(2013\)](#)
cavity / 0.2~75 μ m / fg~pg / ~1e-14m/rHz, GW

G. Guccione+: [PRL 111, 183001 \(2013\)](#)
cavity / 2mm / 0.3mg / ?? m/rHz



R. Kaltenbaek+ : [Experimental Astronomy 34, 123 \(2012\)](#)
cavity / 0.1 μ m / 10fg? / ~1e-12m/rHz?, MAQRO



T. Li+: [Science 328, 1673 \(2010\)](#)
T. Li+: [Nature Physics 7, 527 \(2011\)](#)
tweezer / 1 μ m / 1pg / 1.5mK, 1e-13 m/rHz, Brownian velocity

mass scale

fg

pg

ng

ug

mg

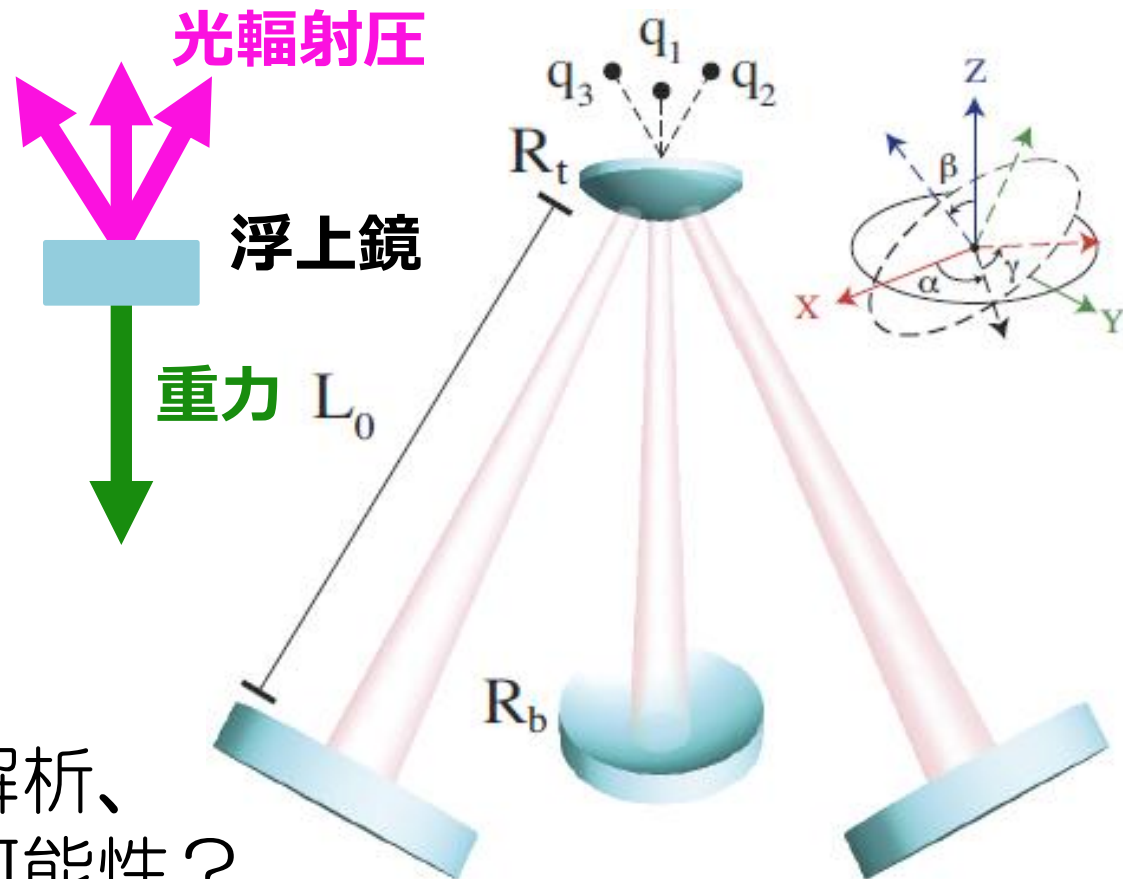
5

反射型の光学浮上

- G. Guccione+: [PRL 111, 183001 \(2013\)](#)

- 反射時の光輻射圧により鏡を支える

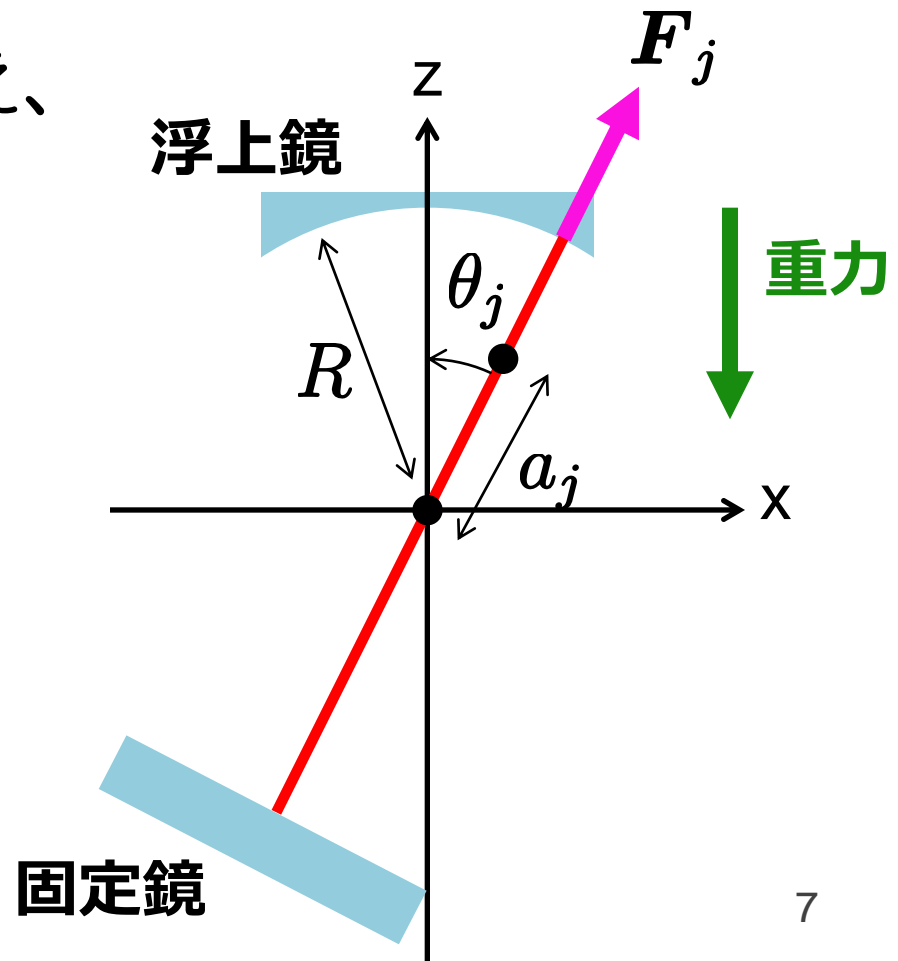
- 1Wずつ入射、
フィネス1000
で0.3 mgの鏡
を浮上可能



- 安定性の詳しい解析、
その他の構成の可能性？

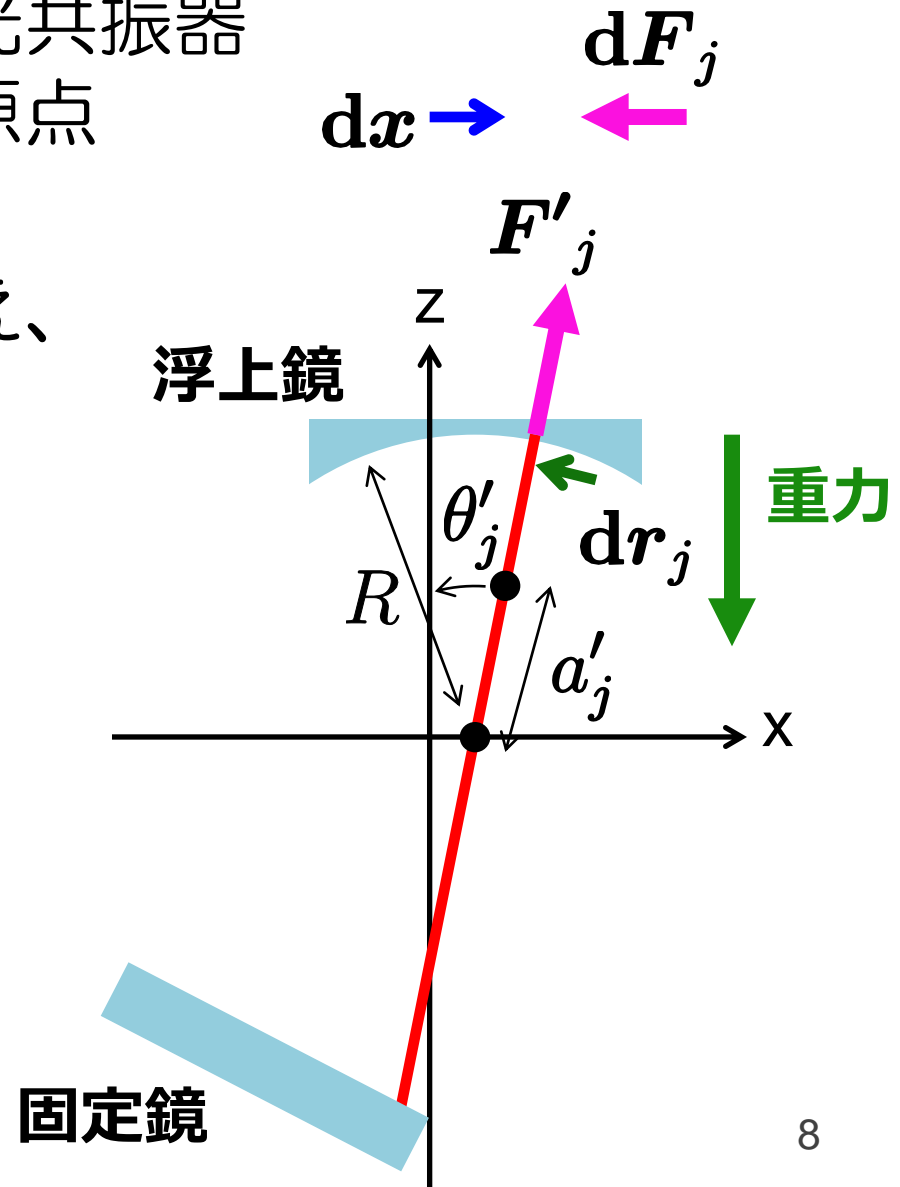
光学浮上の安定性計算

- 浮上鏡の上下に複数の光共振器
浮上鏡の曲率中心を原点
とする3次元座標系
- 浮上鏡に微小変位を与え、
光輻射圧ベクトル F_j
と、浮上鏡に光が当た
たる位置 r_j の変化を
求める
- 運動方程式の
安定性判定



光学浮上の安定性計算

- 浮上鏡の上下に複数の光共振器
浮上鏡の曲率中心を原点
とする3次元座標系
- 浮上鏡に微小変位を与え、
光輻射圧ベクトル F_j
と、浮上鏡に光が当た
たる位置 r_j の変化を
求める
- 運動方程式の
安定性判定



光学浮上の安定条件

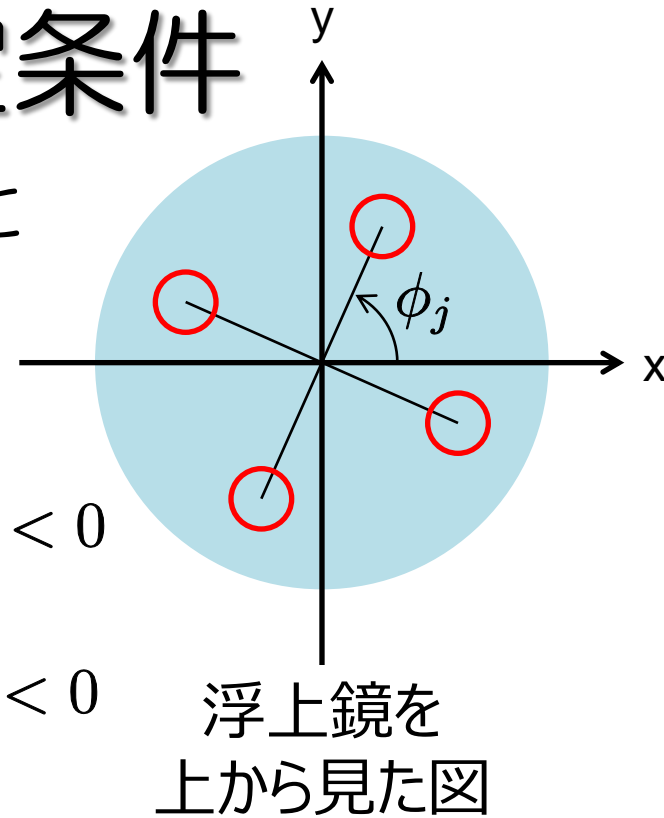
- 共振器配置のz軸対称性を置くと
 $R > 0$ (浮上鏡が下に凸)

かつ

$$\sum_j \left[\frac{F_j}{a_j} - \left(\frac{F_j}{a_j} - K_j^{\text{opt}} \right) \cos^2 \phi_j \sin^2 \theta_j \right] < 0$$

$$\sum_j \left[\frac{F_j}{a_j} - \left(\frac{F_j}{a_j} - K_j^{\text{opt}} \right) \sin^2 \phi_j \sin^2 \theta_j \right] < 0$$

$$\sum_j \left[\frac{F_j}{a_j} - \left(\frac{F_j}{a_j} - K_j^{\text{opt}} \right) \cos^2 \theta_j \right] < 0$$



を満たせば安定(微小変位に対して)

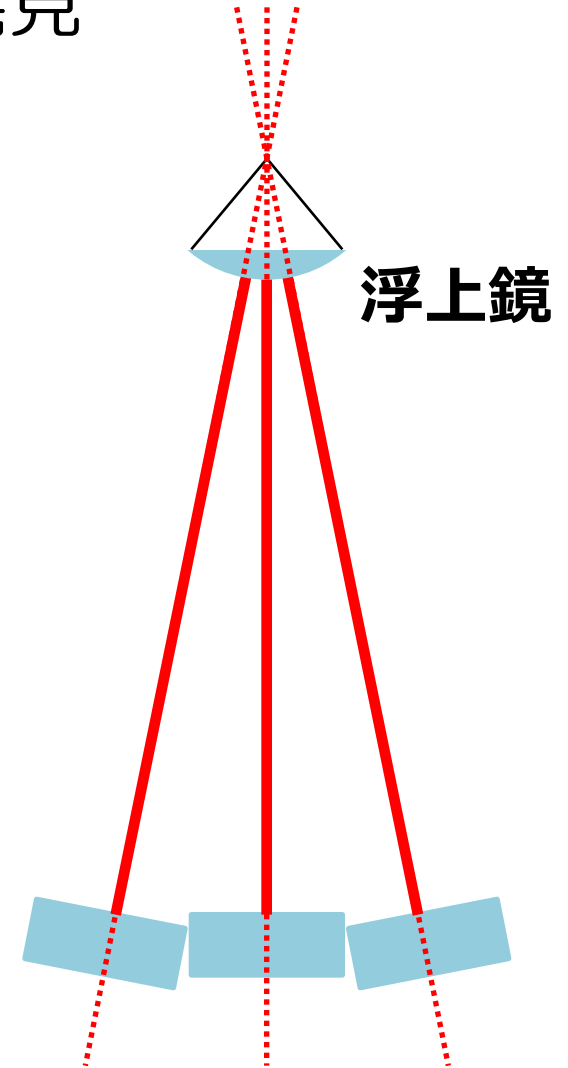
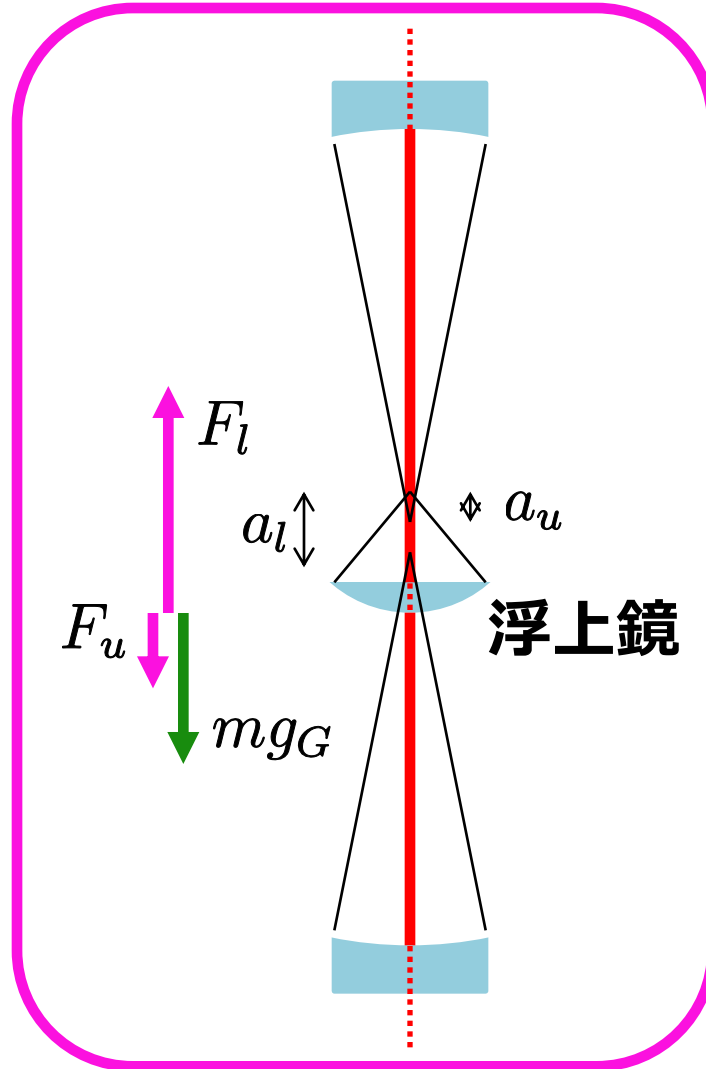
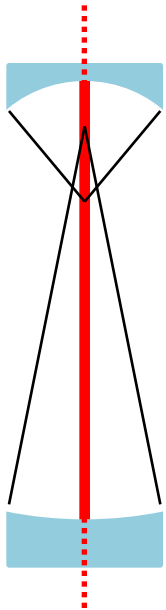
- ざっくりいうと光軸ずれによるばねと光ばねが正ばねなら安定

$$\sum_j \frac{F_j}{a_j} < \sim 0 \quad \sum_j K_j^{\text{opt}} < \sim 0$$

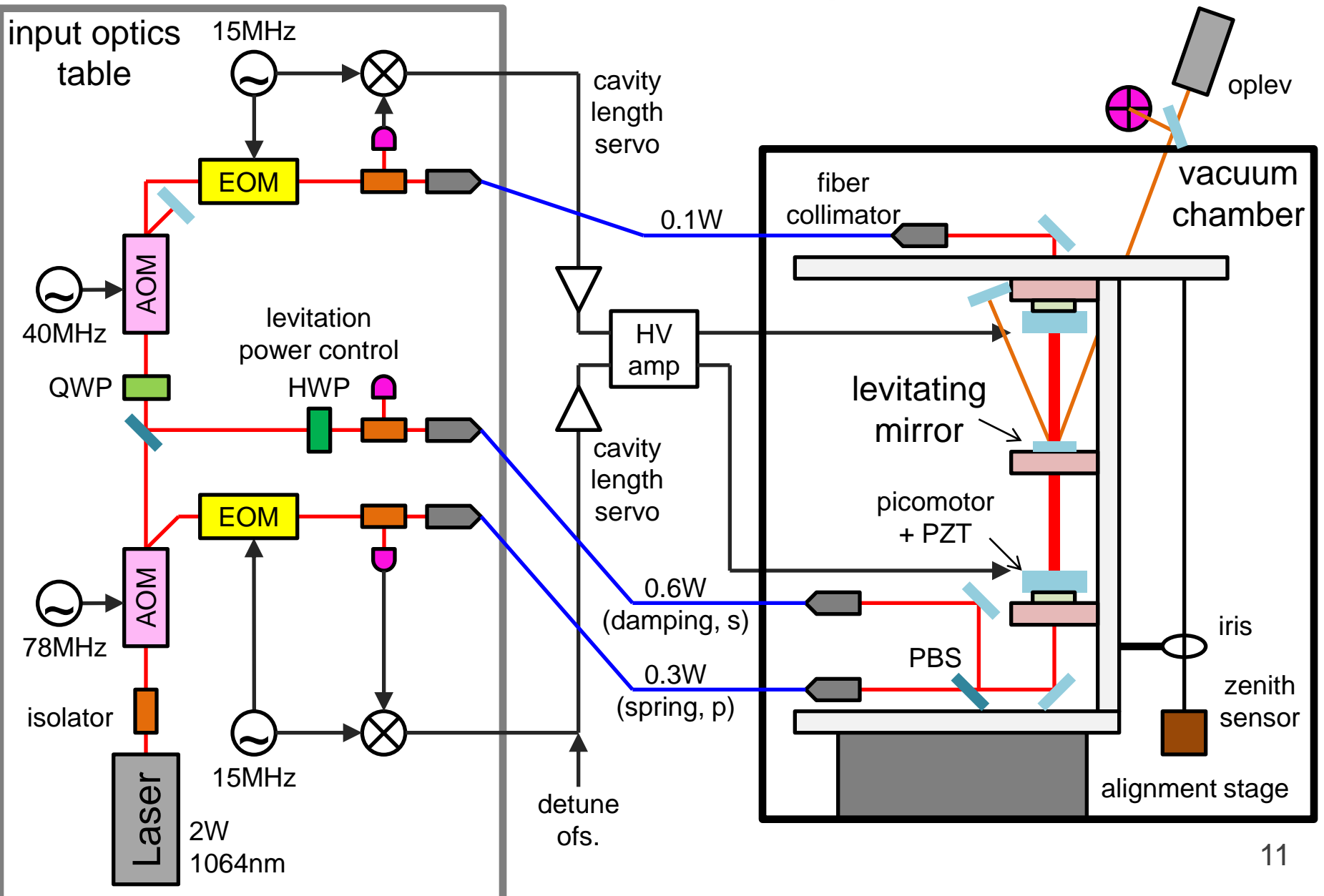
安定な構成の例

- 新しく「サンドイッチ構成」を発見

下に凹だと
不安定

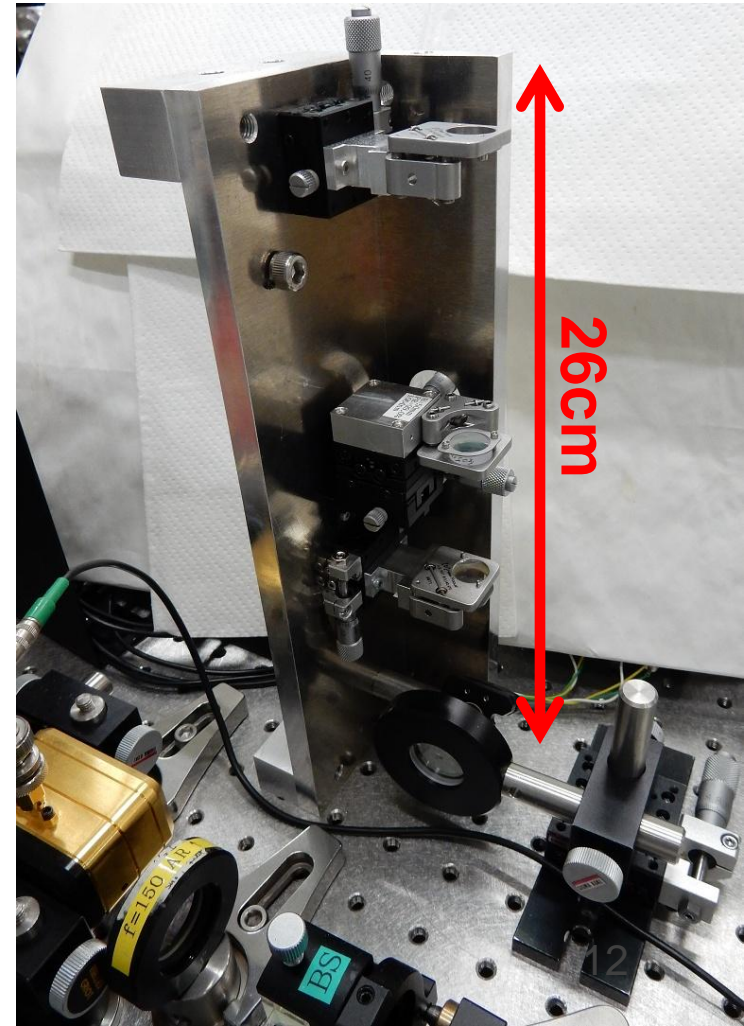


浮上実証実験装置案



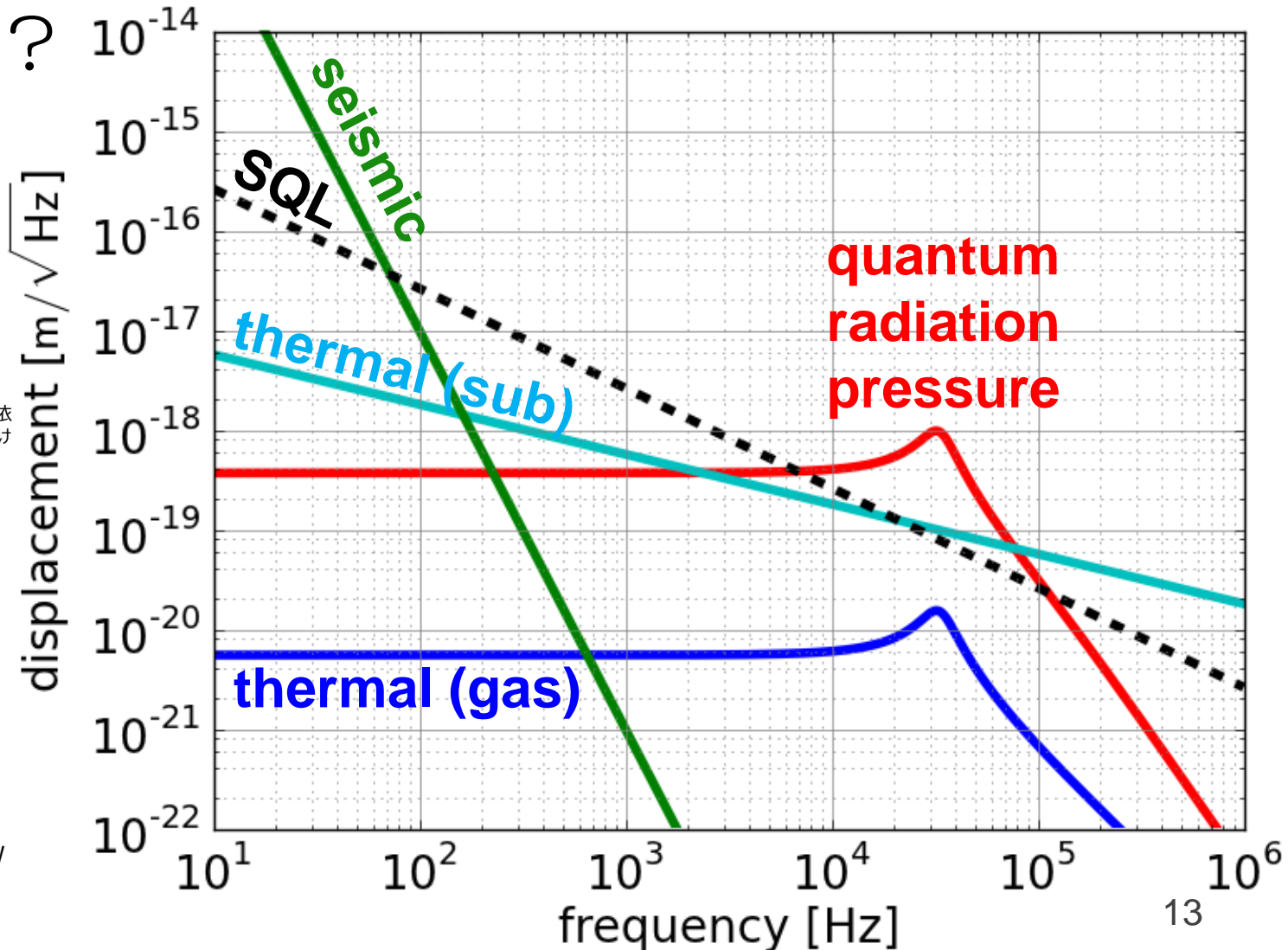
実験準備状況

- 曲率付き微小鏡 → 発注済
曲率30mm(凸)、直径3mm、反射率99.95%以上
- 真空槽
真空ポンプ納品済
→ テスト中
- プロトタイプ共振器実験
→ 進行中



目標変位雑音感度

- 標準量子限界(SQL)超え(共振以下で)
- 魅力的？



注: 鉛直方向の変位雑音感度
- SQLとQBAの交差する周波数は鏡の重さに依存しない(軽くすると内部パワーも減らさないとけないため)
- 基材の熱雑音を下げないとだめかも

== 計算に用いたパラメータ ==
mirror mass: 1.6 mg
mirror diameter: 3 mm
mirror thickness: 0.1 mm

$Q_{\text{sub}} = 1e6$
 $E_{\text{sub}} = 7.2e10 \text{ kg/m}^3$

gas: $1e-4 \text{ Pa}$

finesse: 1.5e4
input power 0.56/0.19, 0.28/0 W
detune: -0.04/0, 1.5/0
 $Q_{\text{eff}} = 2.7$

今後の課題

- 浮上実証まで
 - 初期アライメント/外乱への要求値計算
(光ばねや高次モード等の2次の効果)
 - 光学設計の最適化
 - アライメント/浮上手順の検討
- 感度実現まで
 - レーザー光源の古典雑音
強度安定化、周波数安定化
 $4e-10$ /rtHz @ 1kHz
3 mHz/rtHz @ 1kHz
(マイケルソン干渉計化)
 - 地面振動防振装置の導入 (1段振り子)

まとめ

- 光学浮上の安定性を計算
 - 安定条件の定式化
 - 新しい安定構成の発見
 - 「サンドイッチ構成」
- 新構成を実証するための実験を準備中
- 詳細な光学設計、感度設計が進行中

