

鏡の光学浮上による 標準量子限界の到達

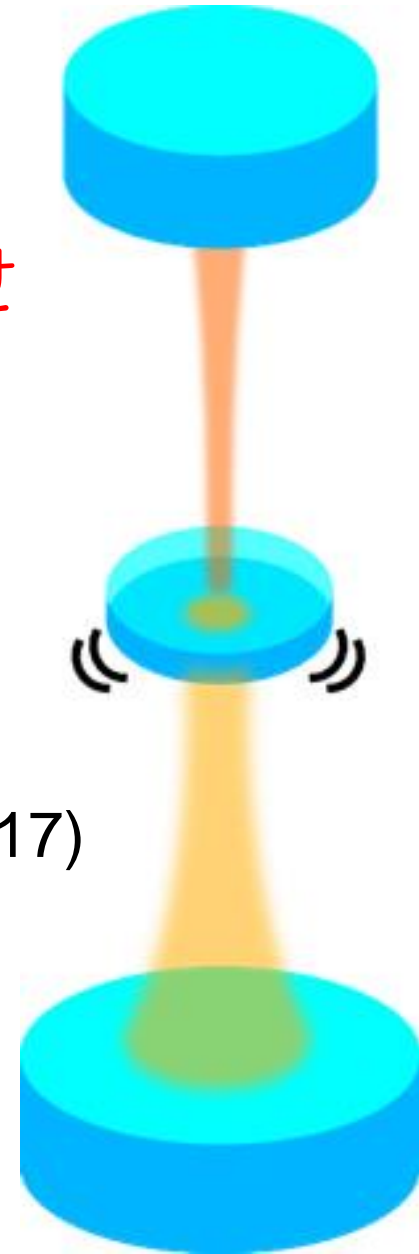
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

長野晃士、和田祥太郎、川崎拓也、
牛場崇文、松本伸之、安東正樹

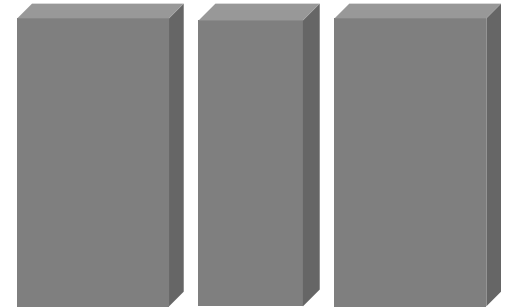
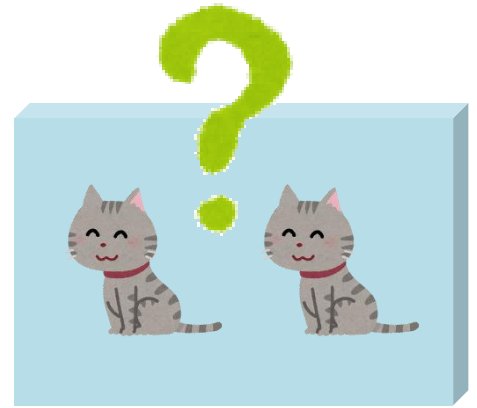
概要

- 巨視的量子力学の検証
mgスケールの鏡の位置の重ね合わせ
- 鏡の光学浮上
機械的支持に伴う熱雑音がない
サンドイッチ構成による安定な浮上
標準量子限界の到達が可能
であることを示した
YM+, Optics Express 25, 13799 (2017)
- 実験状況
浮上鏡の特性評価
光学浮上の安定性検証
レーザー周波数安定化



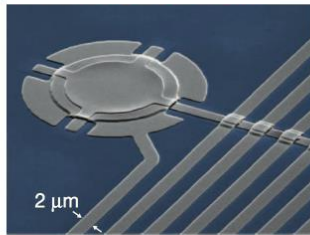
巨視的量子力学

- 量子力学はスケールによらない
- にもかかわらず、**巨視的重ね合わせ**は観測されていない
- 様々な解釈
 - 古典的雑音が大きいだけ
 - 非線形シュレディンガー方程式
 - 重力デコヒーレンス
- 古典・量子境界を探るため、**幅広い質量スケールで検証**する必要あり
 - **機械光学系**で基底状態実現

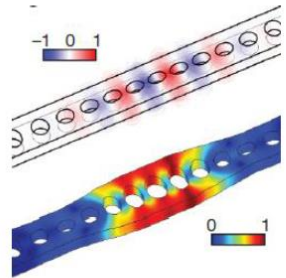


機械光学系の先行研究

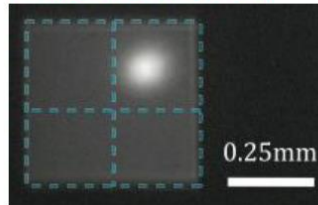
- 基底状態実現の必要条件のひとつ
位置測定精度の標準量子限界到達
- **mgスケール**では標準量子限界に未到達
Planck mass (22 ug)



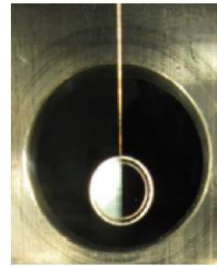
membrane, 48 pg
Taufel+ (2011)



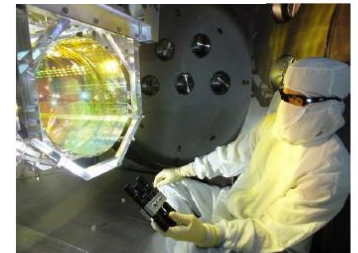
nanobeam, 311 fg
Chan+ (2011)



membrane, 7 ng
Peterson+ (2016)



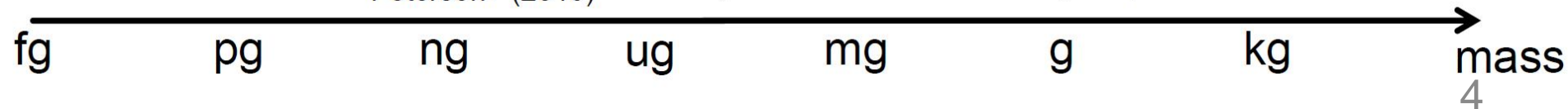
suspended mirror, 5 mg
Matsumoto+ (2015)



suspended mirror, 40 kg
aLIGO



suspended mirror, 1 g
Neben+ (2012)

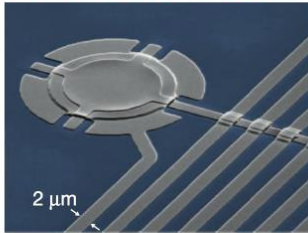


機械光学系の先行研究

- 基底状態実現の必要条件のひとつ
位置測定精度の標準量子限界到達
- **mgスケール**では標準量子限界に未到達

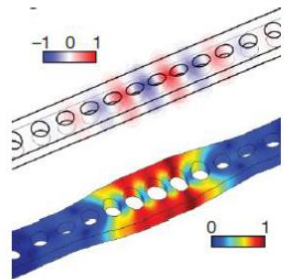
Planck mass (22 ug)

reached SQL



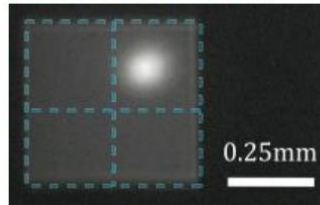
membrane, 48 pg
Taufel+ (2011)

reached SQL

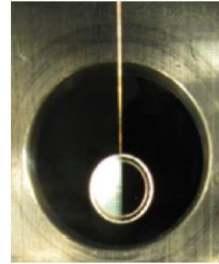


nanobeam, 311 fg
Chan+ (2011)

reached SQL

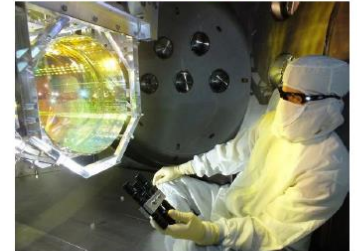


membrane, 7 ng
Peterson+ (2016)



suspended mirror, 5 mg
Matsumoto+ (2015)

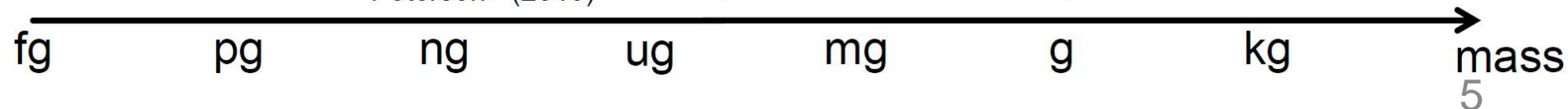
SQL soon?



suspended mirror, 40 kg
aLIGO



suspended mirror, 1 g
Neben+ (2012)

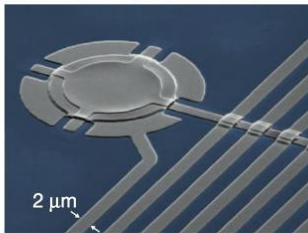


機械光学系の先行研究

- 基底状態実現の必要条件のひとつ
位置測定精度の標準量子限界到達
- mgスケールでは標準量子限界に未到達

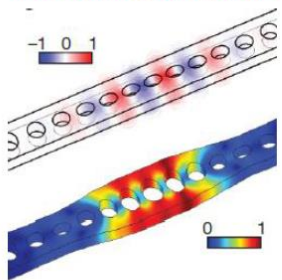
Planck mass (22 μg)

reached SQL



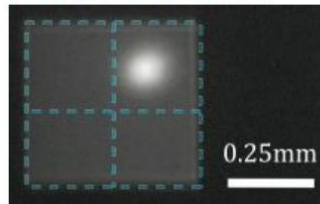
membrane, 48 pg
Taufel+ (2011)

reached SQL

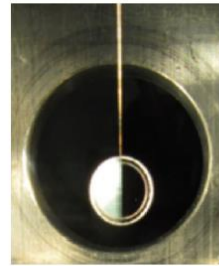


nanobeam, 311 fg
Chan+ (2011)

reached SQL



membrane, 7 ng
Peterson+ (2016)

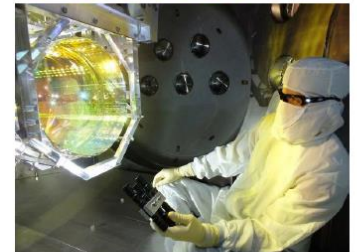


suspended mirror, 5 mg
Matsumoto+ (2015)

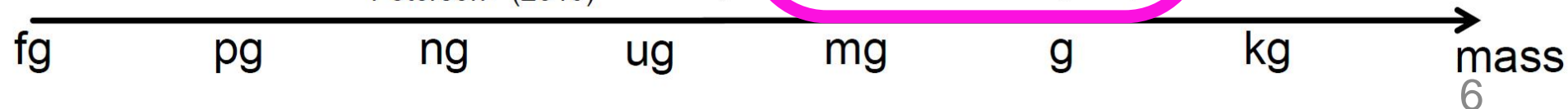


suspended mirror, 1 g
Neben+ (2012)

SQL soon?



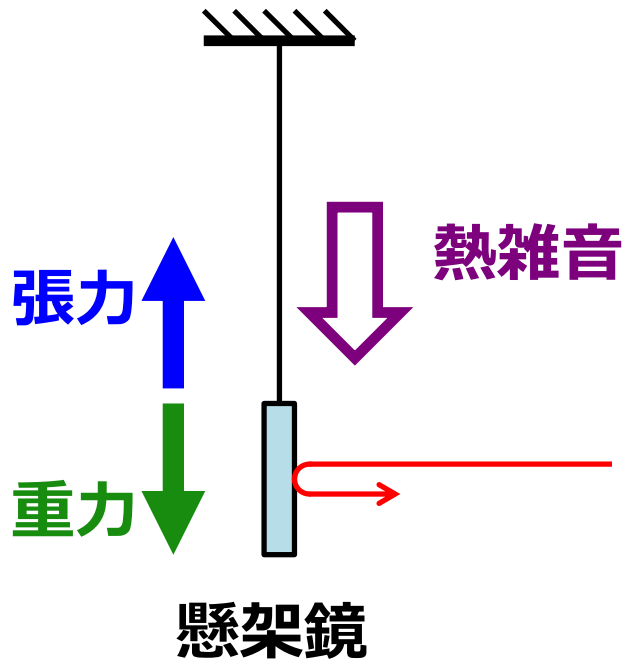
suspended mirror, 40 kg
aLIGO



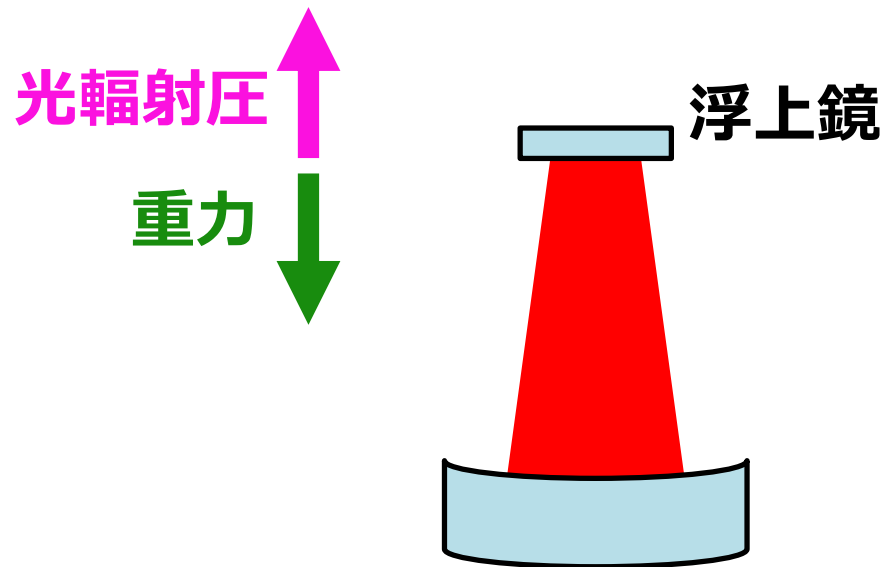
鏡の光学浮上

- 振り子を用いた実験では懸架系の散逸から熱的揺動力が混入し、量子性を覆い隠してしまう
- 光輻射圧のみを用いて支持する光学浮上を提案

機械的支持

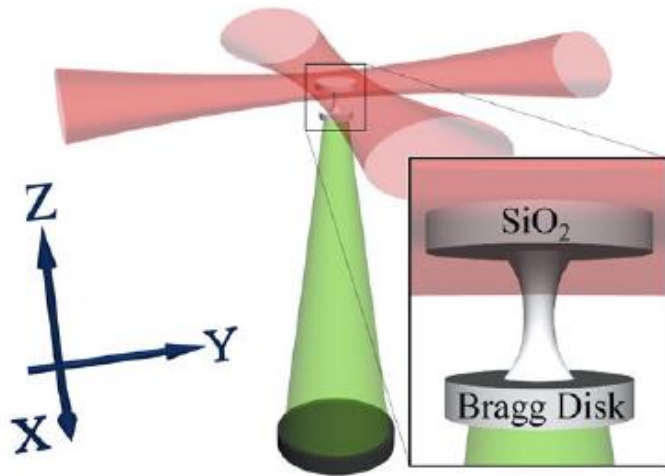


光学浮上

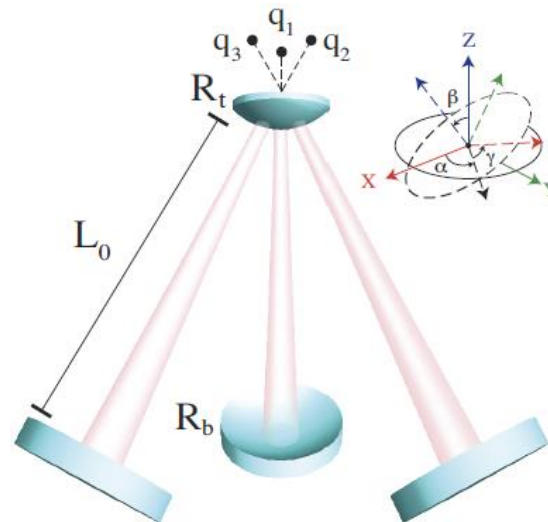


サンドイッチ構成

- これまで提案されていた手法に比べ
シンプルな構成
- 浮上鏡を**上下**から光共振器ではさむ

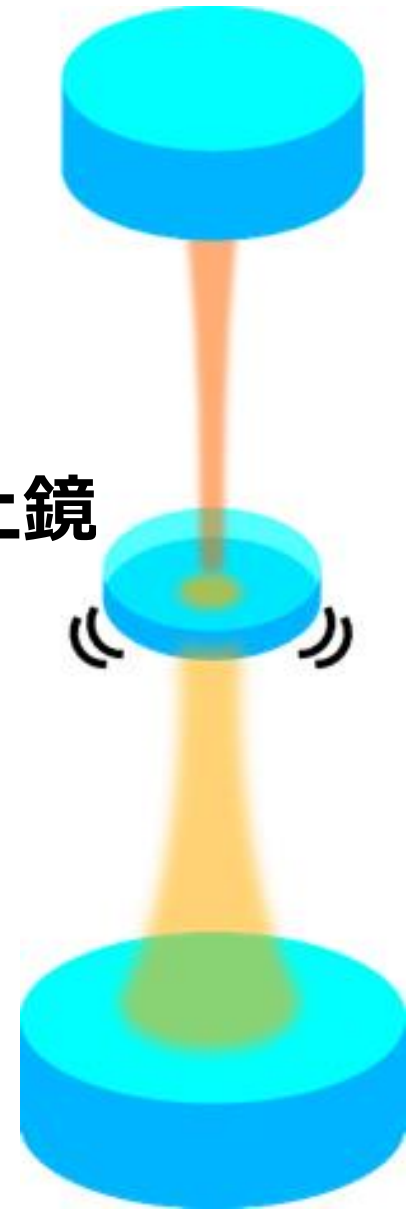


S. Singh+: PRL 105, 213602 (2010)



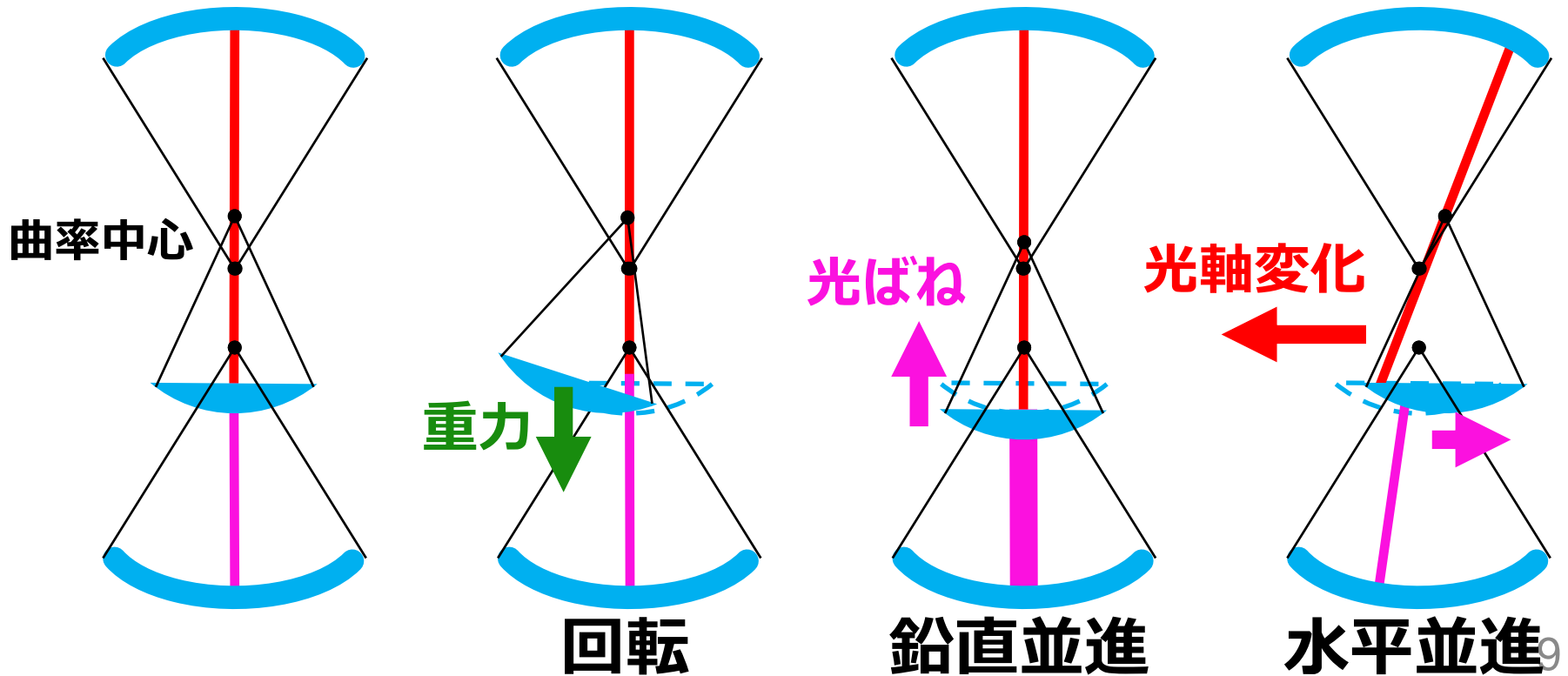
G. Guccione+: PRL 111, 183001 (2013)

浮上鏡



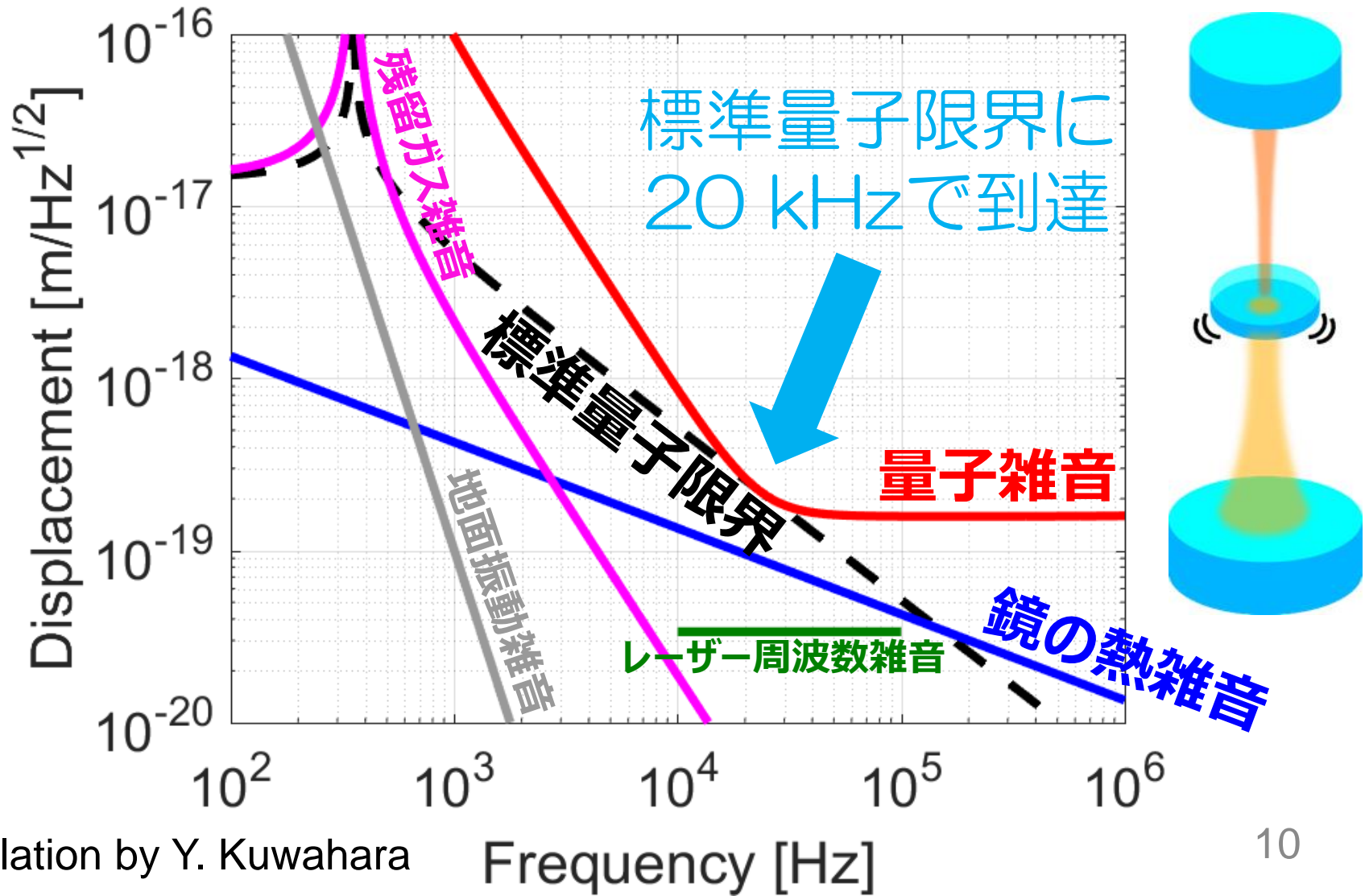
浮上の安定性

- 回転は**重力**により安定
- 鉛直方向は**光ばね効果**により安定
- 水平方向は**光軸の変化**により安定



標準量子限界の到達

- 0.2 mg鏡、フィネス100、13 W + 4 W入射で可能

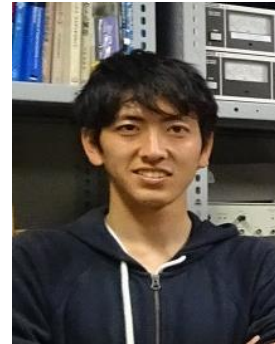


技術的課題

- mgスケールの鏡の製作(直径数mm以下)
- 水平方向の安定性の実証
- 浮上に至るまでの手順
- レーザー周波数安定化 ($0.1 \text{ mHz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 20 kHz)

技術的課題

- mgスケールの鏡の製作(直径数mm以下)
 - 試作鏡の製作とその特性評価 (長野晃士)
- 水平方向の安定性の実証
- 浮上に至るまでの手順
 - ねじれ振り子を用いた実証実験 (和田祥太郎)
- レーザー周波数安定化 ($0.1 \text{ mHz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 20 kHz)
 - 非対称マイケルソン干渉計実験 (川崎拓也)

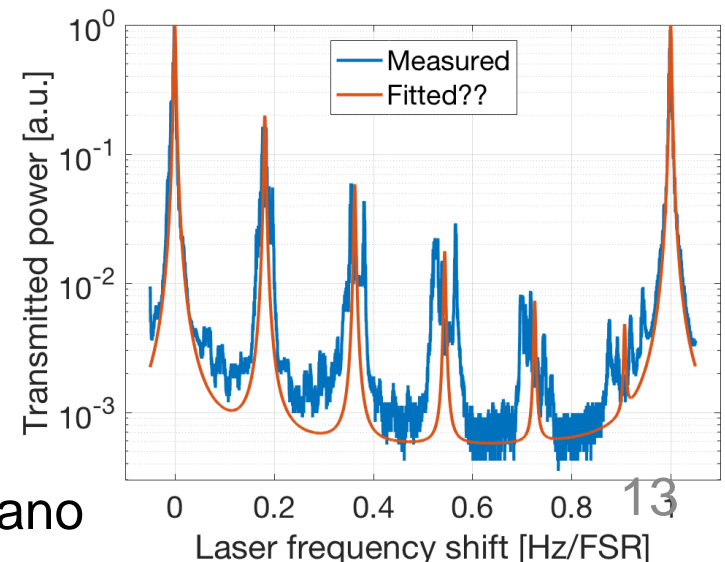


試作鏡の製作と性能評価

- 試作鏡の設計値
 - 質量 **1.6 mg**
 - ϕ 3mm, t 0.1 mm
 - 曲率半径 30 ± 10 mm
 - 反射率 99.95 %



- 8枚発注して7枚納品、
うち欠けていないのは1枚のみ
- 光共振器を組んで曲率や
反射率を評価中
 - 曲率: 15.9 ± 0.5 mm
(preliminary)
 - 反射率: 99.5%以上



Plot by K. Nagano

ねじれ振り子による安定性検証

- **ねじれ振り子**で実効的にmgスケールの鏡を実現
- ねじれ振り子に働く**復元力**を測定
- 十分な力感度を持つねじれ振り子の製作は完了
- 光共振器を組み込み中

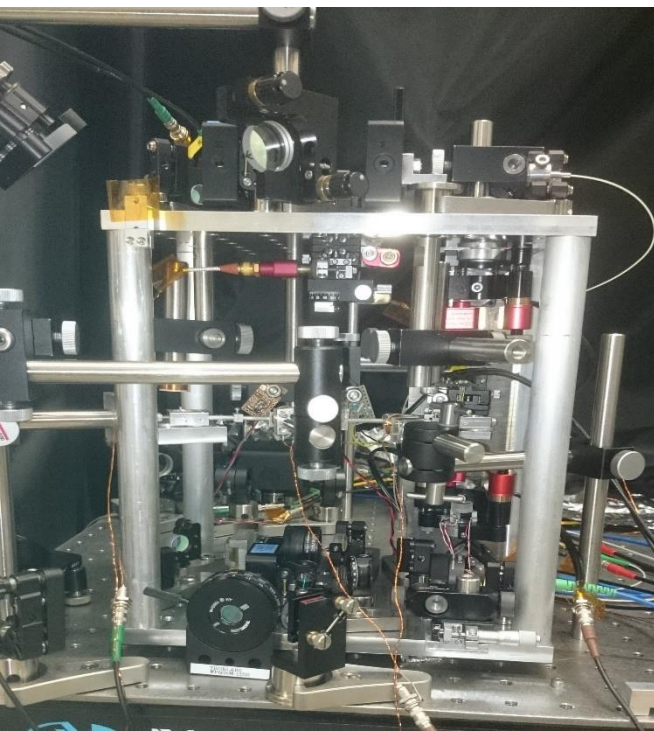
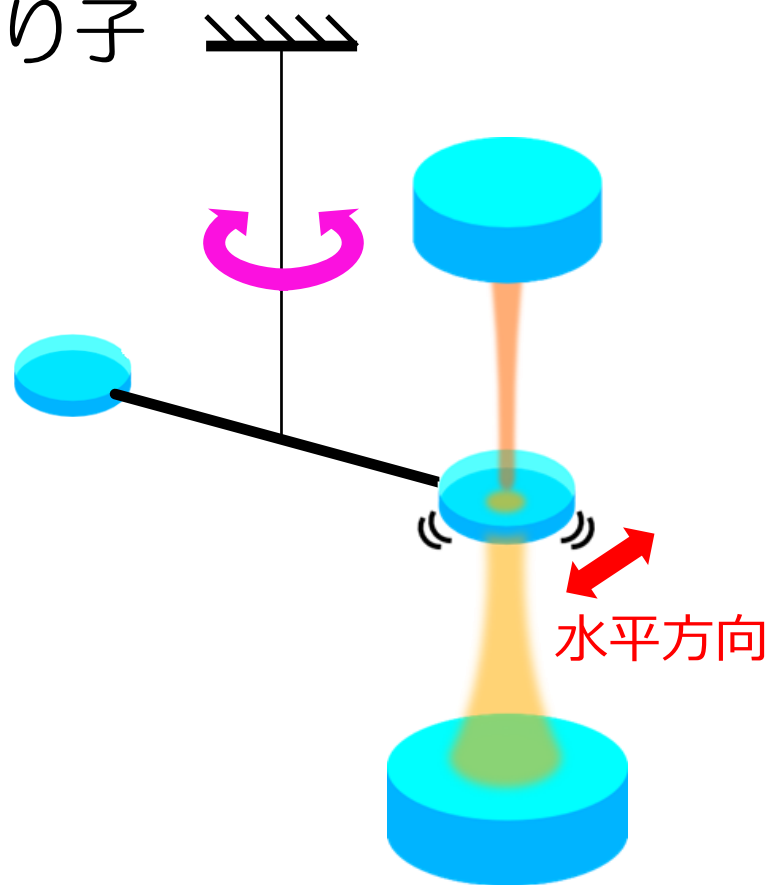
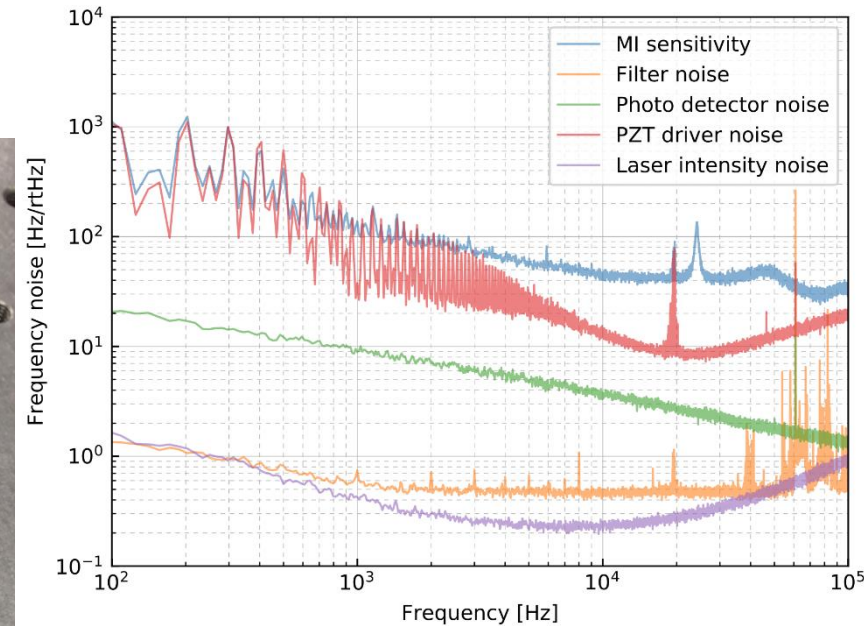
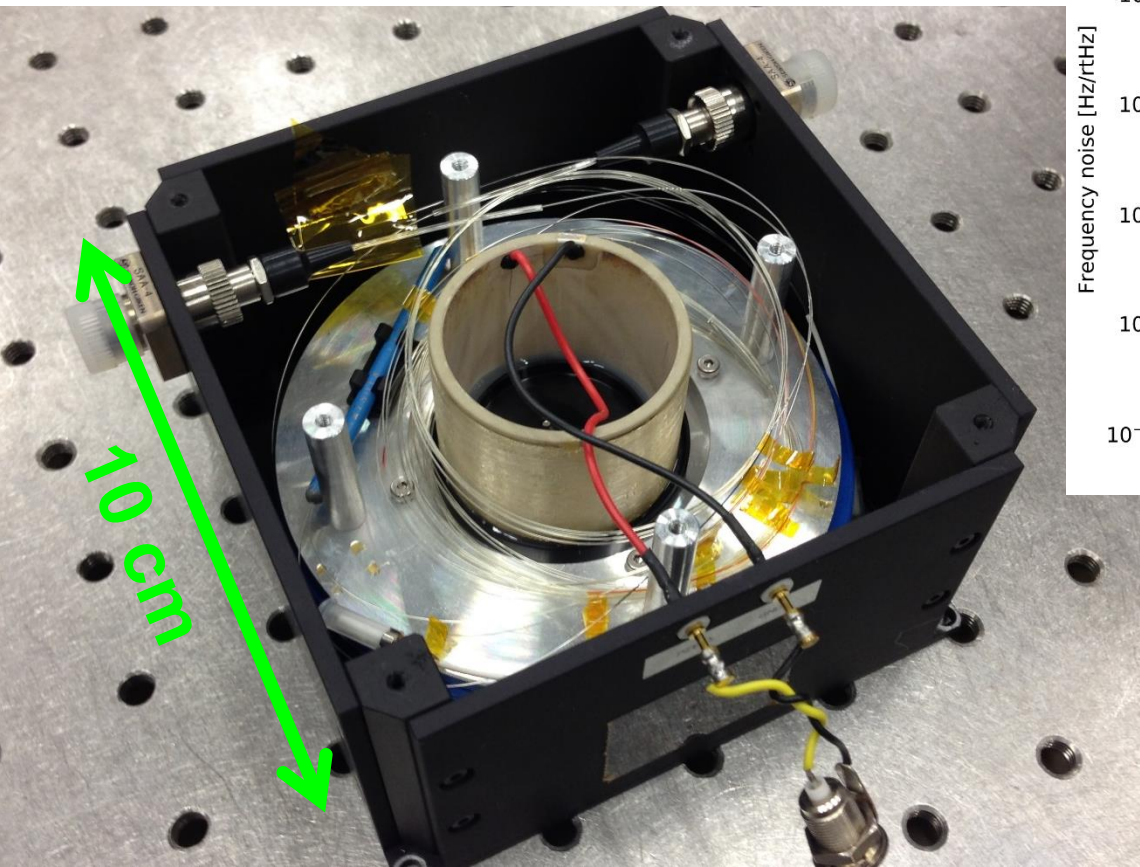


Photo by S. Wada



レーザー周波数安定化

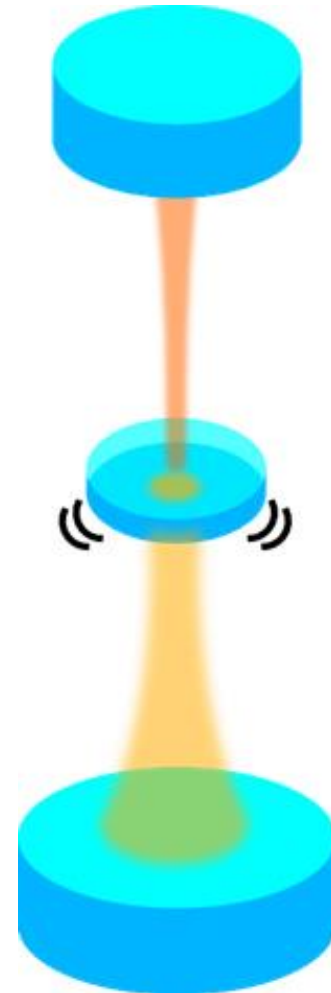
- 要求値: $0.1 \text{ mHz}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 20 kHz
- 100 mファイバを用いた非対称マイケルソン干渉計などを評価中



Plot by T. Kawasaki

まとめ

- 巨視的量子力学の検証を目的として
サンドイッチ構成による鏡の光学浮上を提案
- 例えば
 - 0.2 mgの鏡が20 kHzで
標準量子限界に到達可能
- 技術的課題解決に向けて
 - 試作鏡の製作と特性評価
 - ねじれ振り子による安定性と
浮上手順の実証
 - レーザー周波数安定化実験
を進行中



補足

感度計算パラメータ一覧

Levitated mirror		
mass	m	0.2 mg
radius	r	0.35 mm
ROC	R	30 mm
beam radius	$w_{L,U}$	0.14 mm, 0.19 mm
coating thickness	d_{Ta}	91 nm \times 7 layers
	d_{Si}	237 nm \times 6 layers
Young's modulus	$Y_{s, Ta, Si}$	73 GPa, 140 GPa, 73 GPa
Poisson ratio	$\nu_{s, Ta, Si}$	0.17, 0.28, 0.17
loss angle	$\phi_{s, Ta, Si}$	1×10^{-6} , 2×10^{-4} , 5×10^{-5}
refractive index	$n_{s, Ta, Si}$	1.45, 2.07, 1.45
Laser		
wavelength	λ	1064 nm
input power	$P_{L,U}^{in}$	13 W, 4 W
frequency noise	δf_a	0.1 mHz/ \sqrt{Hz}
Cavity		
length	$l_{L,U}$	95 mm, 50 mm
fixed mirror's ROC	$R_{L,U}$	120 mm, 30 mm
COC distance	$a_{L,U}$	5.0 mm, 1.3 mm
finesse	$\mathcal{F}_{L,U}$	100, 100
intracavity power	$P_{L,U}^{circ}$	420 W, 130 W
normalized detuning	$\delta_{L,U}$	-0.005, 0.018
Temperature	T	300 K
Air pressure	P	10^{-5} Pa

全体の実験セットアップ

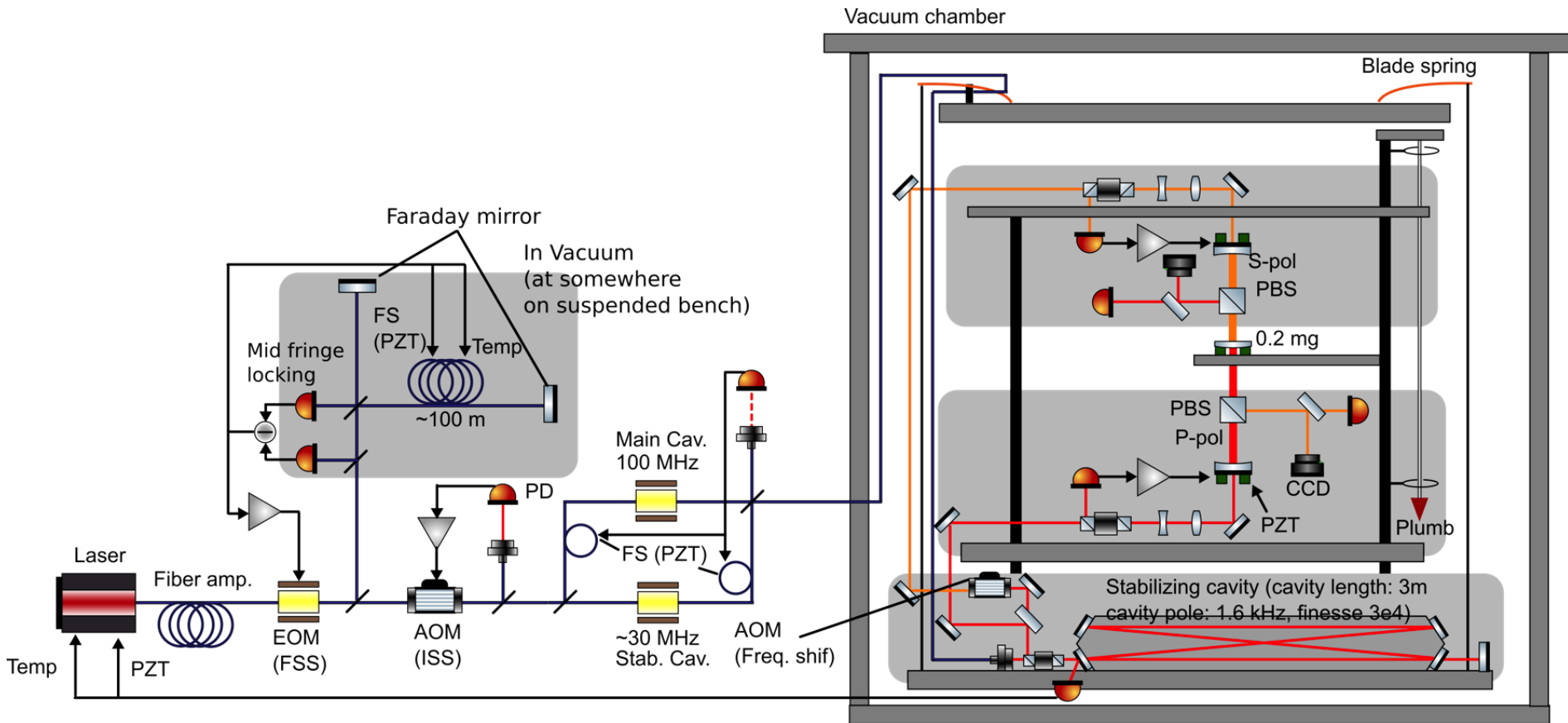


Figure by K. Nagano