# 光輻射圧による 鏡の光学浮上技術の開発(1)

東京大学理学系研究科 物理学専攻安東研究室 和田祥太郎

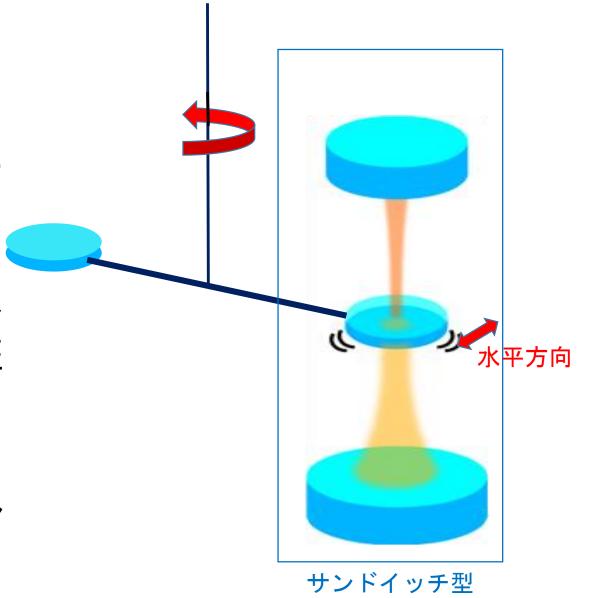
長野晃士,川﨑拓也,道村唯太,牛場崇文,松本伸之,安東正樹

## 今回の発表の概要

・mgスケールでの量子力学の検証の ために光学浮上の実現を目指す

・光学浮上の一つの構造であるサンドイッチ型の水平方向の安定性検証 のためにねじれ振り子を用いる

・今回安定性の検証に必要なねじれ振り子の共振周波数測定に成功した



## 発表の流れ

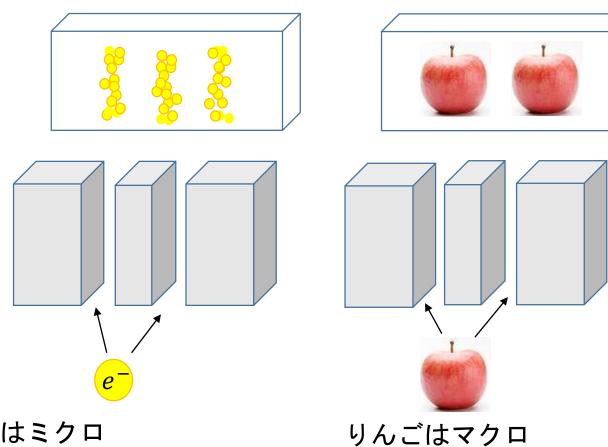
- 1. 光学浮上の研究背景
- 2. 光学浮上の安定性検証
- 3. 今回行ったこと
- 4. 結果

# 1. 研究背景

#### 背景

量子力学で未だに 解決されていない問題

→マクロな系で重ね合わせ状態がみられるかどうか



電子はミクロ →重ね合わせ状態は観測済み

→重ね合わせ状態は未観測

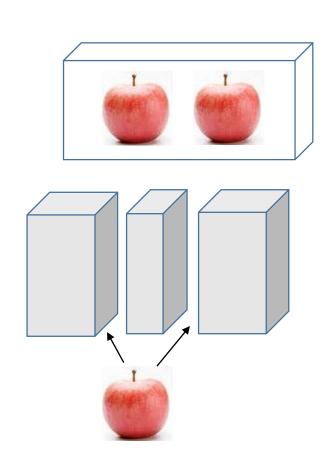
#### 観測されない理由

- 重い物体にも重ね合わせ状態が見られる
  - →単純に古典雑音に埋もれてる?
- 重い物体には重ね合わせ状態が存在しない
  - →質量スケールで境界線が存在?

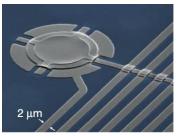


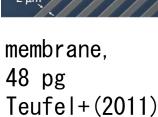
様々な質量スケールで実験することが必要

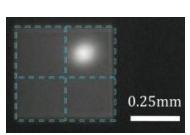
機械光学系実験(光を振動子に当てることによる位置測定)がよく用いられる



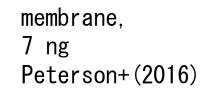
## 機械光学系を用いた先行研究







nanomechanical oscillator, 311 fg Chan+(2011)





suspended mirror, 5 mg Matsumoto+(2014)



40 kg

suspended mirror,

GW detector (LIGO, VIRGO, KAGRA)
Suspended mirror,



Neben+ (2012)

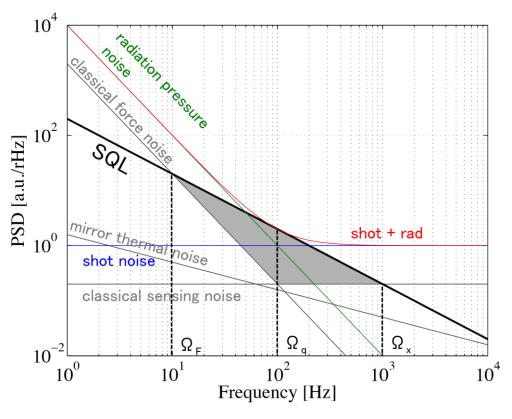
1 g

fg pg ng ug mg g kg 質量スケール

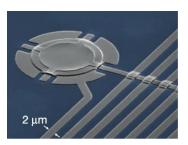
### 巨視的量子力学の検証のための条件



古典雑音が SQLを下回ることが必要



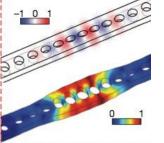
SQL (Standard Quantum Limit) とは? 量子力学の不確定性原理から生じる測定限界のこと



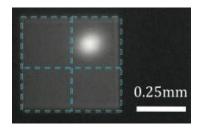
SQL到達

membrane, 48 pg

Teufel+(2011)

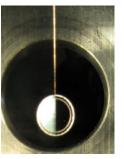


nanomechanical oscillator, 311 fg Chan+(2011) SQL到達

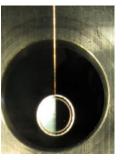


membrane, 7 ng Peterson+(2016)

SQL到達



未到達



suspended mirror, 5 mg Matsumoto+(2014)



suspended mirror, 1 g Neben+ (2012)

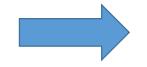




suspended mirror, 40 kg GW detector (LIGO. VIRGO, KAGRA)

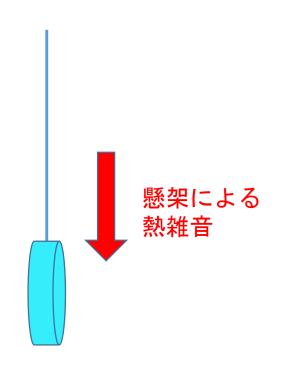
ほぼSQL到達

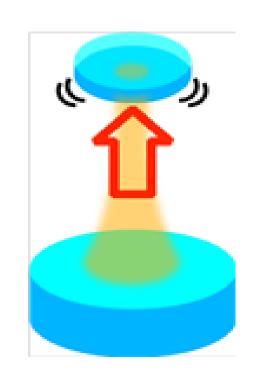
fg pg kg 質量スケール ng mg ug g



今回はmgスケールのSQL到達を目指す

#### mgスケールでのSQL到達への障壁~熱雑音~





光学浮上とは?

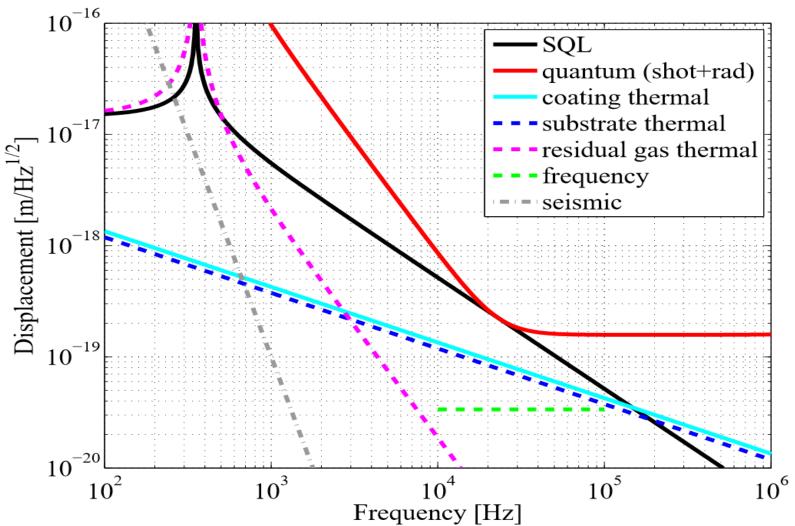
光の輻射圧で 鏡を浮かせること

振り子

→懸架による熱雑音で SQL到達が困難 光学浮上

→鏡の支持による熱雑音が生じない

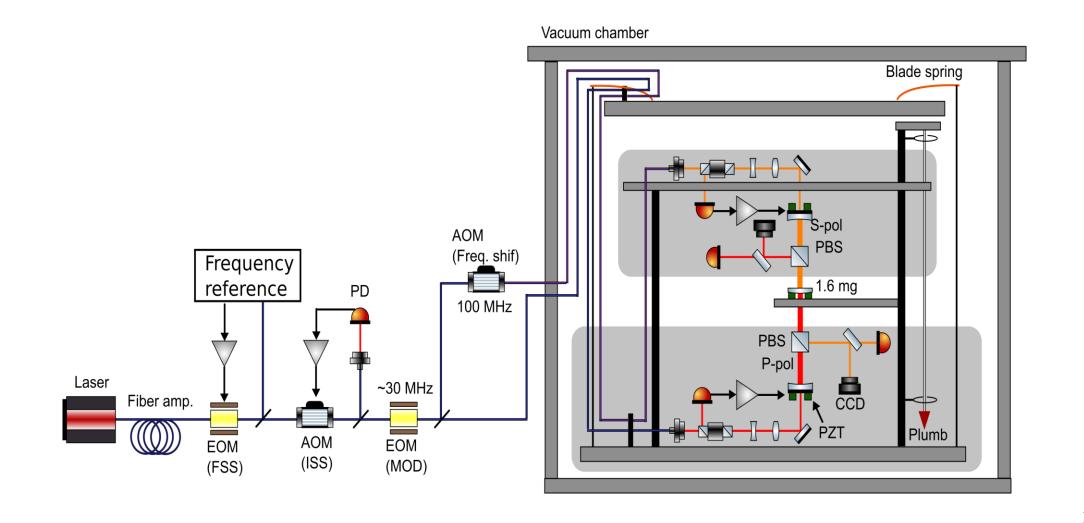
#### ノイズスペクトル



- 0.2 mgの鏡
- 13 Wのレーザー入射光
- 23 kHz付近でSQL到達

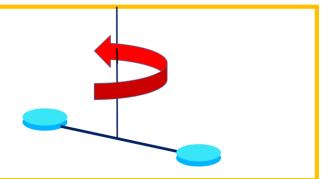
Y. Michimura+(2017) より

#### 原理実証のためのセットアップ



#### 今回の学会で話すこと

- 光学浮上の水平方向の安定性検証
  - → ねじれ振り子による測定(和田)

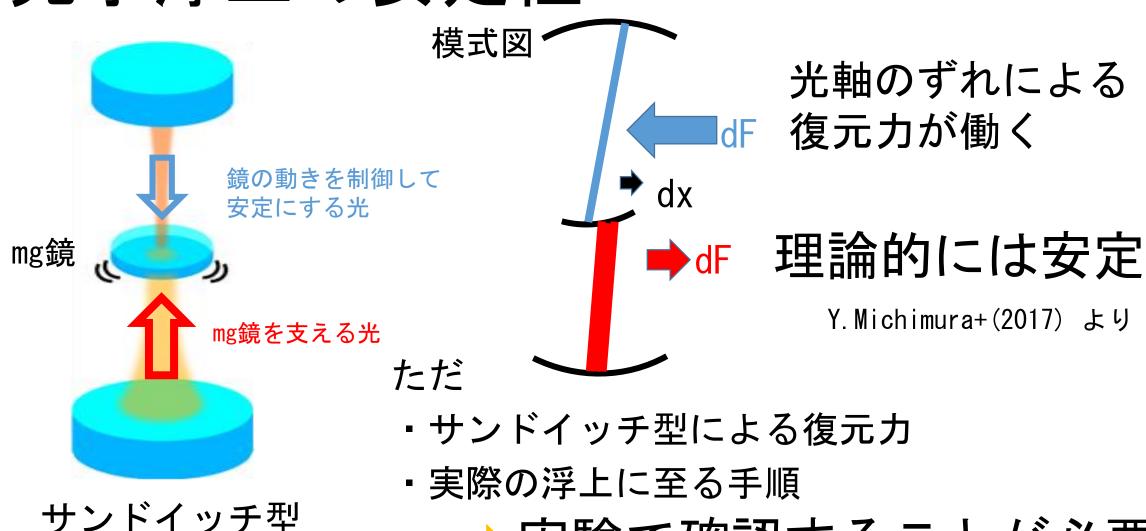


- 周波数雑音の低減
  - → 非対称マイケルソン干渉計(川﨑くん)
- ・浮上鏡の評価
  - → 曲率などのパラメーター測定(長野さん)



# 2. 安定性の検証

### 光学浮上の安定性



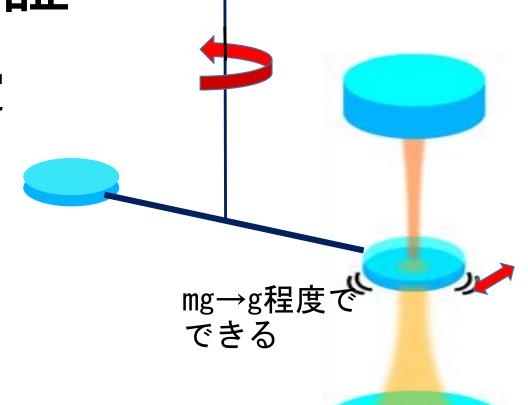
→実験で確認することが必要

## 水平方向の安定性検証

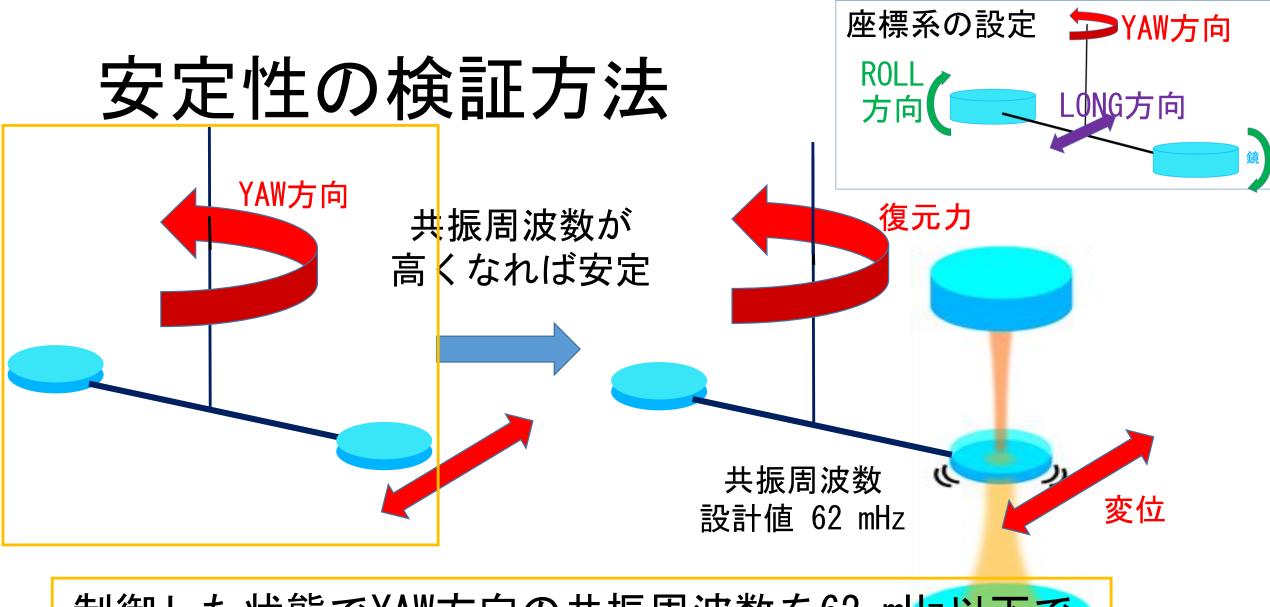
サンドイッチ型の水平方向の安定 性を実験で検証したい

→ねじれ振り子を用いる





水平方向に関して浮いている状態に近い環境を g程度の鏡でつくれる



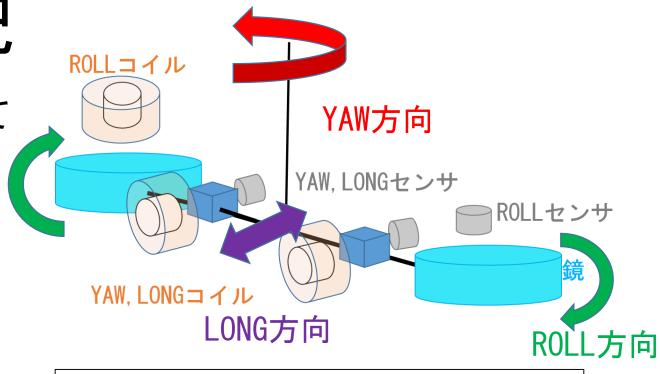
制御した状態でYAW方向の共振周波数を62 mHz以下で 測定することが必要

## 前回までの状況

フォトセンサとコイルで制御して 共振周波数を測定

#### 問題点

- ・測定ごとに共振周波数が変化
  - →再現性が見られない



共振周波数 設計値 22 mHz<62 mHz(要求値)

共振周波数測定が実現できていなかった

### 原因として考えられるもの

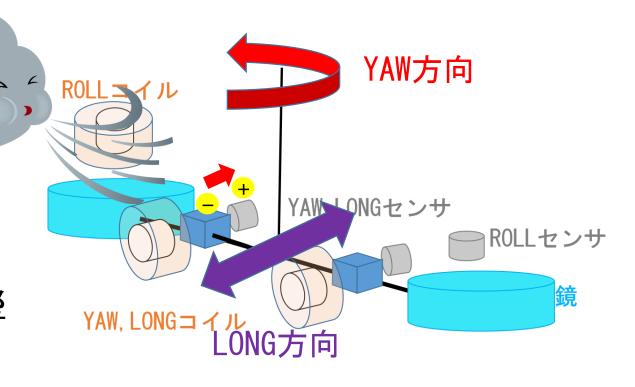
YAW方向とLONG方向との カップリング

・センサと振り子間の 静電気力

→①光てこの制御に改善

- 大気中での測定による影響

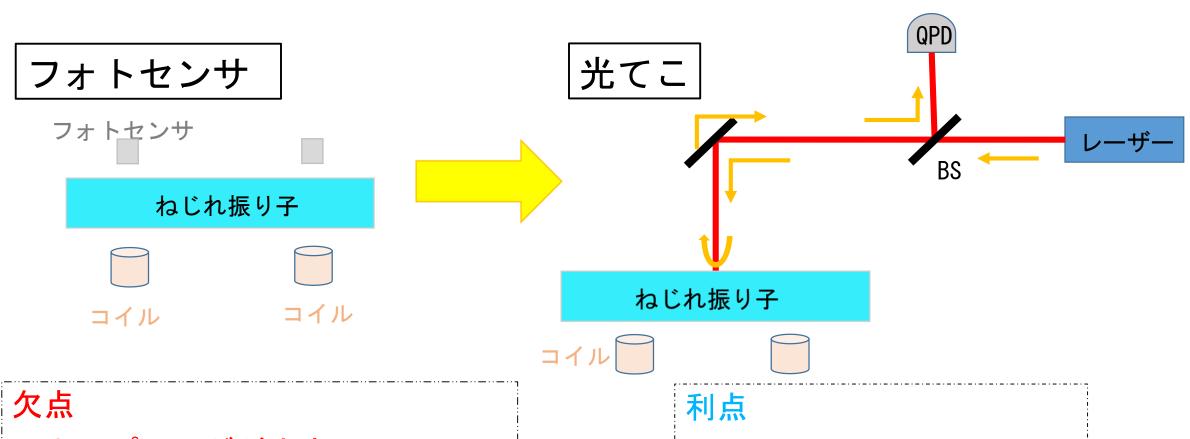
→②真空中での測定に改善



# 3. 今回行ったこと

- ①光てこでの制御
- ②真空中で測定

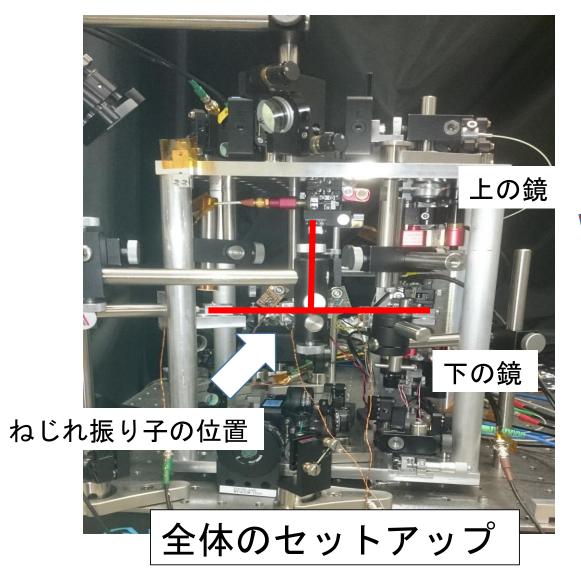
#### ①光てこを使った制御



- カップリングが大きい
- センサによる静電気力が生じる

- カップリングが小さい
- ・静電気力が生じない

# ②真空中での測定





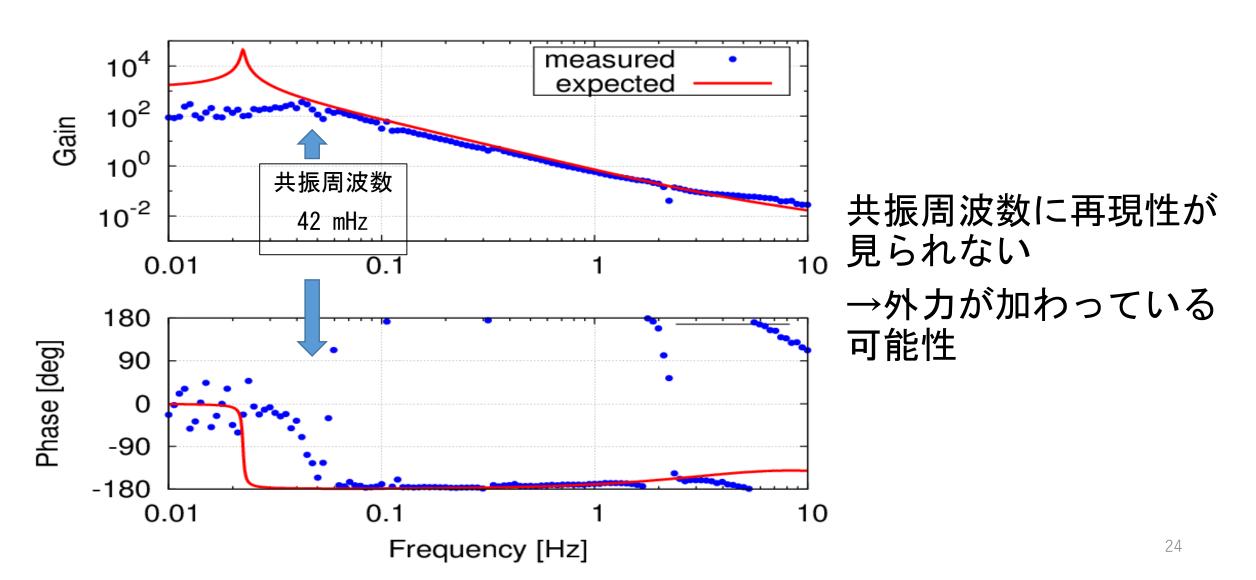


真空槽に入れた

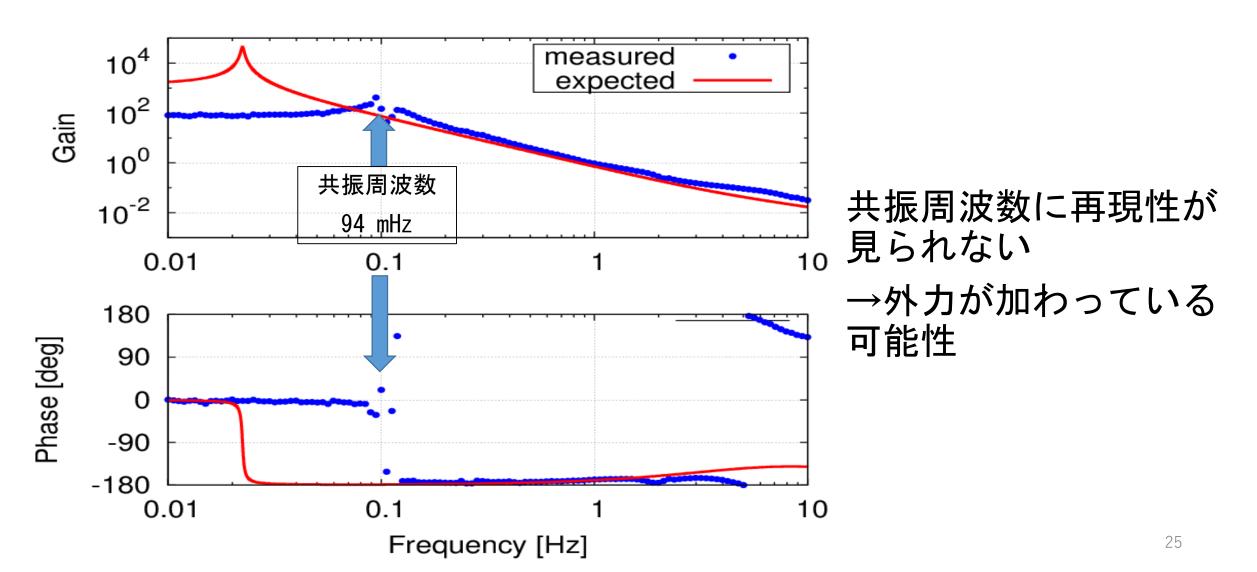
## 4. 結果

- ・従来の結果(フォトセンサ、大気中)
- 今回の結果(光てこ、真空中)

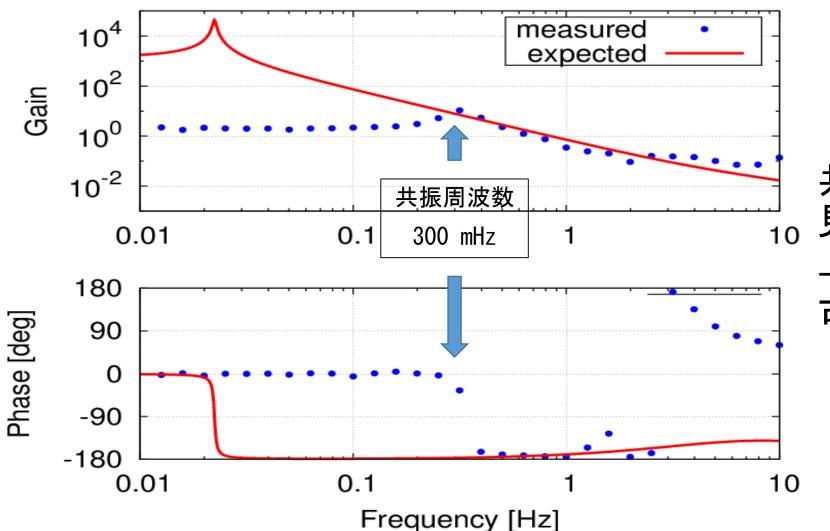
### 従来の結果(フォトセンサ、大気中)



## 従来の結果(フォトセンサ、大気中)

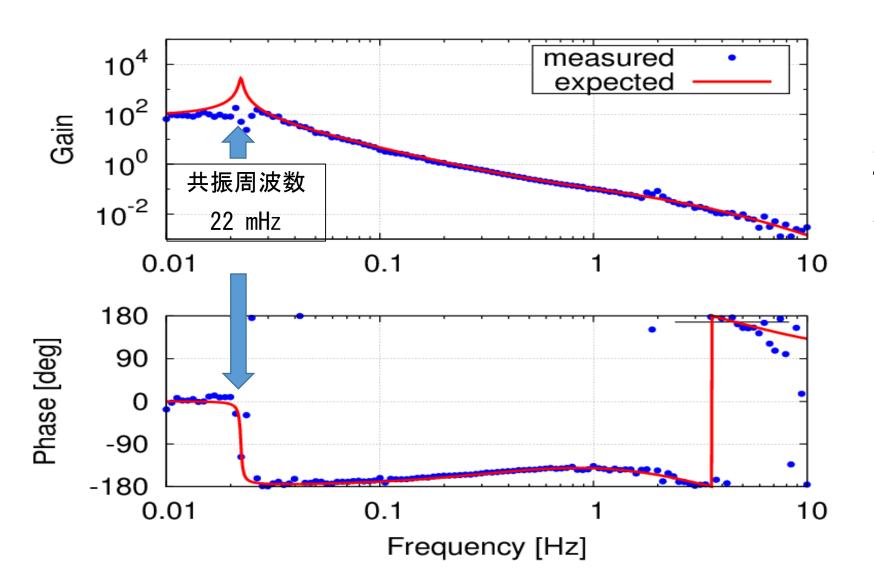


#### 従来の結果(フォトセンサ、大気中)

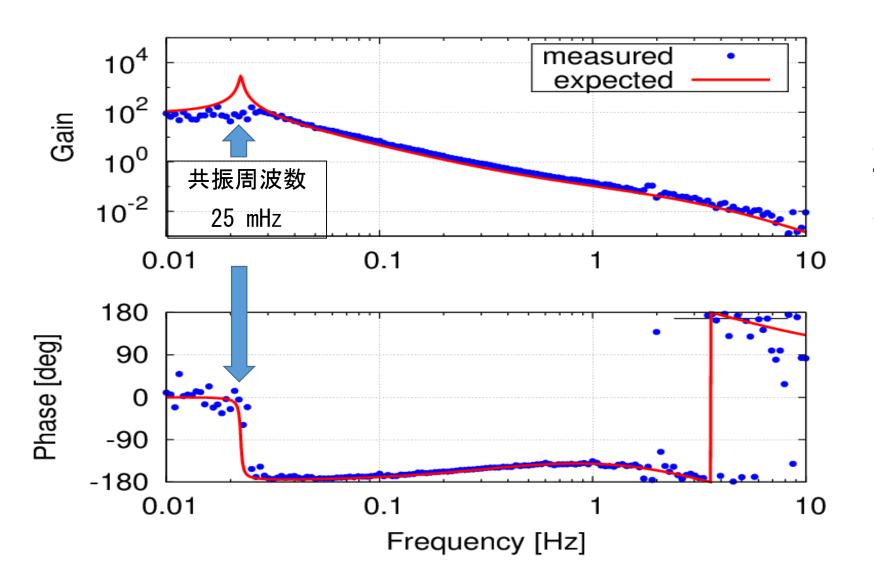


共振周波数に再現性が 10 見られない

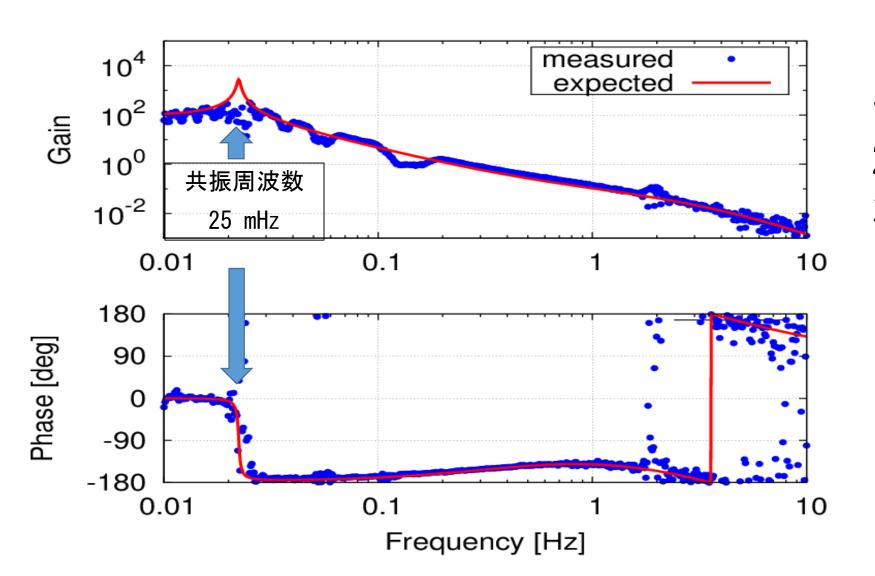
> →外力が加わっている 可能性



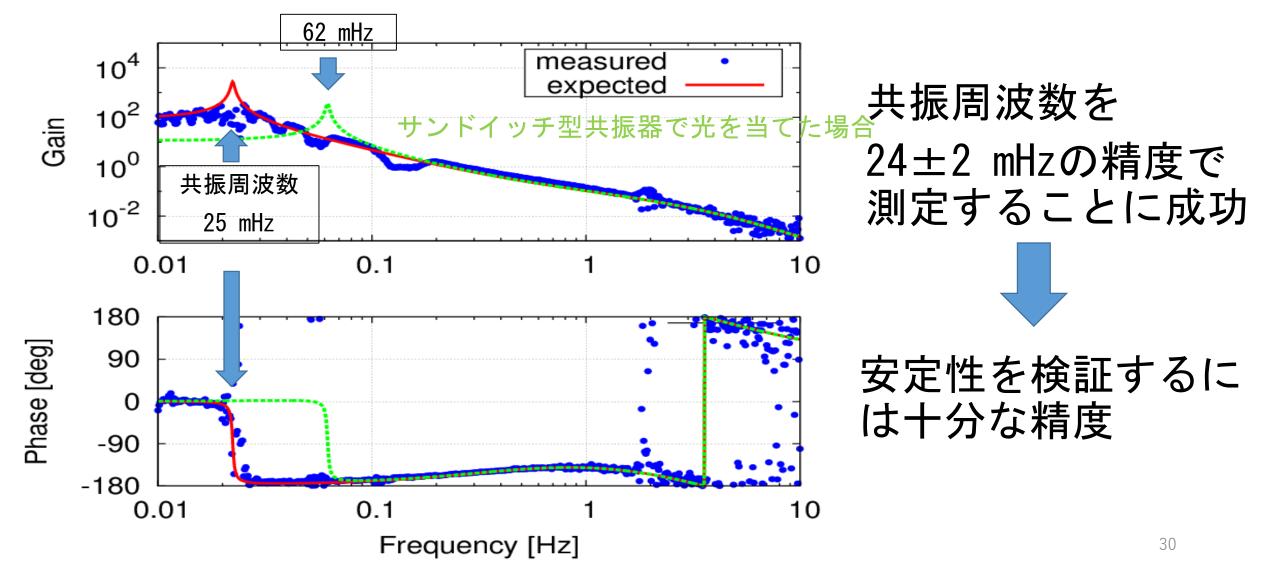
共振周波数を 24±2 mHzの精度で 測定することに成功



共振周波数を 24±2 mHzの精度で 測定することに成功



共振周波数を 24±2 mHzの精度で 測定することに成功



# まとめ

・センサを光てこに改善した

・大気中から真空中での測定に改善した

・YAW方向の共振周波数を24±2 mHzの精度で測定することに成功した

# 今後の展望

ねじれ振り子を制御した状態で サンドイッチ型共振器をロックできるか確認

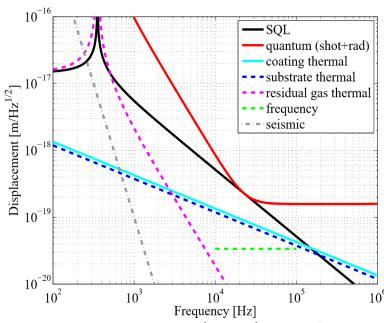
- 水平方向の安定性を検証
  - →サンドイッチ型共振器によりかたくなった 共振周波数を測定

# 終わり

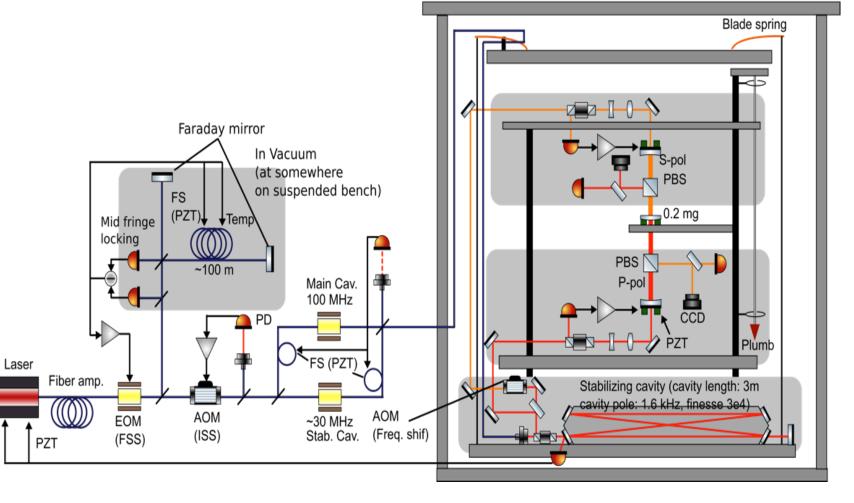
# おまけ

#### 光学浮上の全体像

Temp

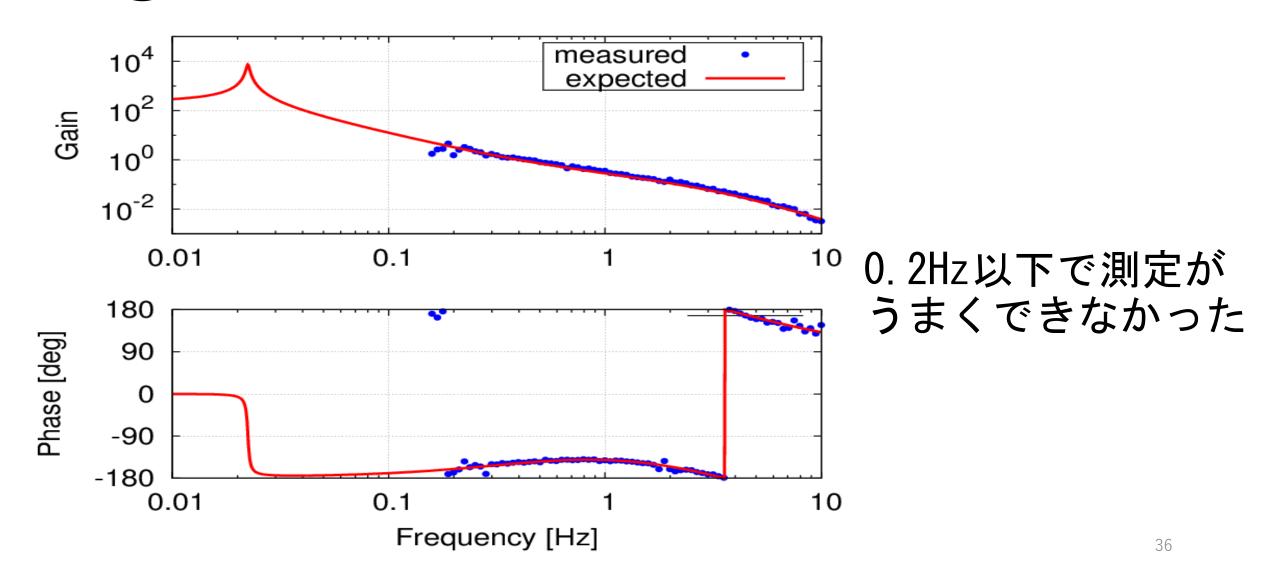


- Y. Michimura+(2017) より
- 0.2 mgの鏡
- 13 Wのレーザー入射光
- 23 kHz付近でSQL到達

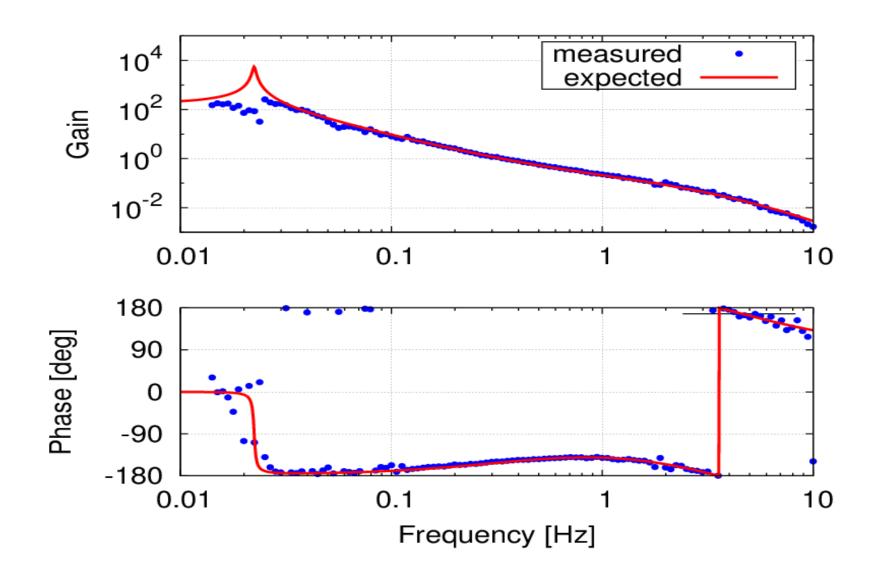


Vacuum chamber

## ②光てこでの制御(大気中)



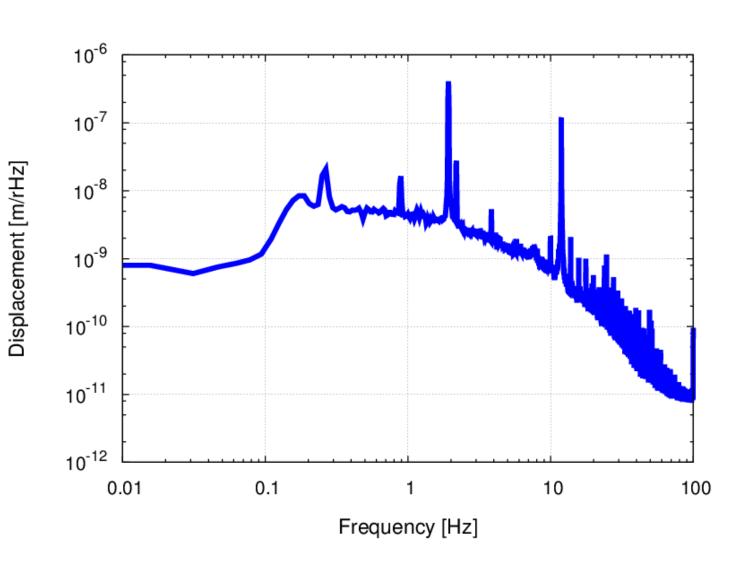
## ②光てこでの制御(大気中)



#### 取り組む必要があること

- ねじれ振り子の位置制御
  - → YAW方向のRMS 10 μm 以下(ビーム径×0.1) ROLL方向のRMS 9 μm 以下(ピエゾのレンジ) に制御することが必要
- ・ねじれ振り子のYAW方向の共振周波数測定
  - → ねじれ振り子の共振周波数62 mHz以下 (光でかたくなった共振周波数)

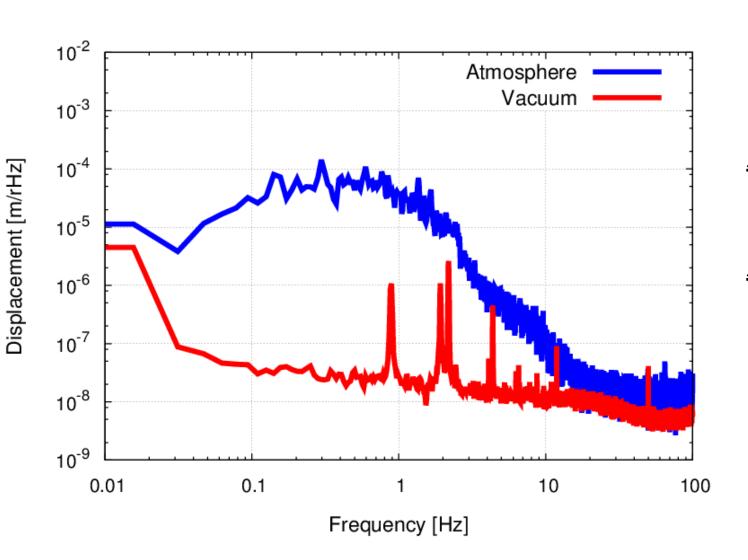
#### YAW方向のパワースペクトル(光てこ)



制御後のRMS 0.039 $\mu m < 10 \mu m$ 

制御後は要求値を満たした。

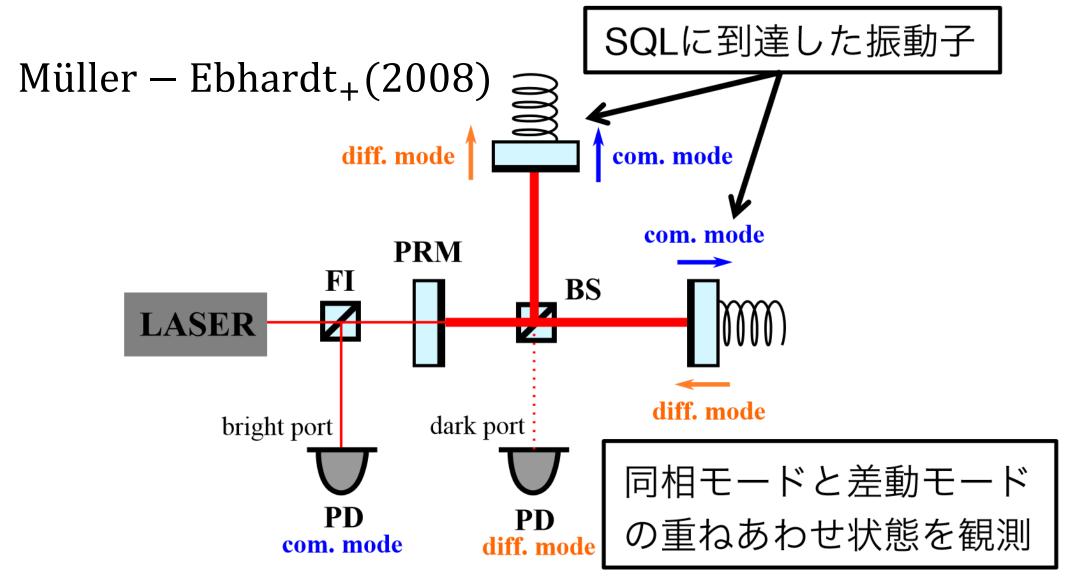
#### ROLL方向のパワースペクトル(制御なし)



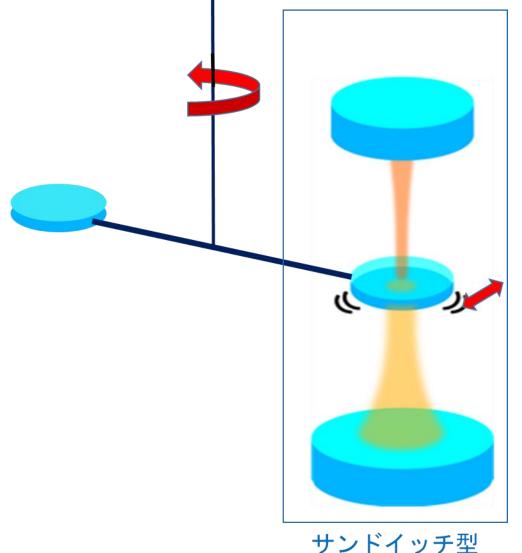
制御後のRMS 0.61  $\mu m < 10 \mu m$ 

制御後は要求値を満たした。

#### 位置の重ね合わせ状態の観測



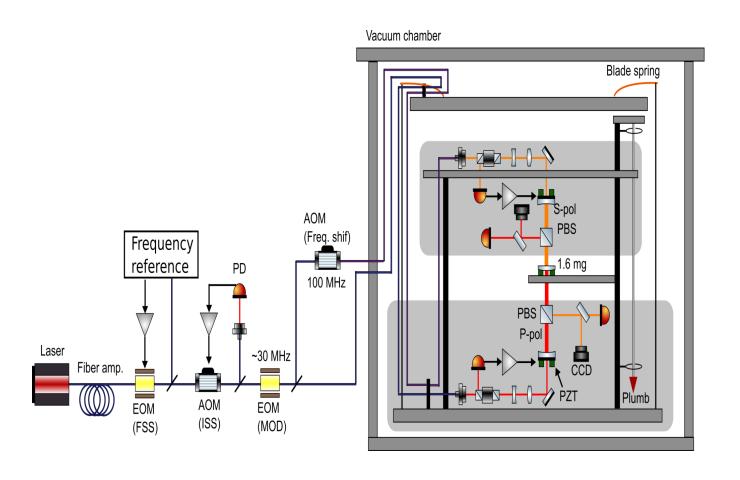
# サンドイッチ共振器の設計値



上側共振器 入射パワー1.4W フィネス1100 共振器内パワー170W

下側共振器 入射パワー0.2W フィネス4200 共振器内パワー360W

#### 原理実証のためのセットアップ

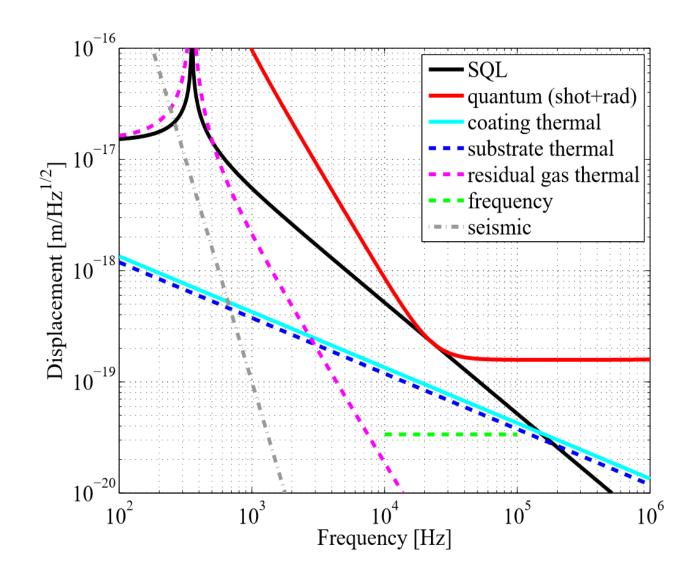


1.6 mgの鏡 波長1064 nm

上側共振器 入射パワー2.6W フィネス700

下側共振器 入射パワー8.5W フィネス700

#### ノイズスペクトル



0.2 mgの鏡 波長1064 nm 23 kHz付近でSQL到達

上側共振器 入射パワー4W フィネス100 共振器内パワー130W

下側共振器 入射パワー13W フィネス100 共振器内パワー420W

#### 水平方向の安定性検証までの道しるべ

①実験装置の開発と特性評価→ここまで桑原さん



②ねじれ振り子の位置制御→○

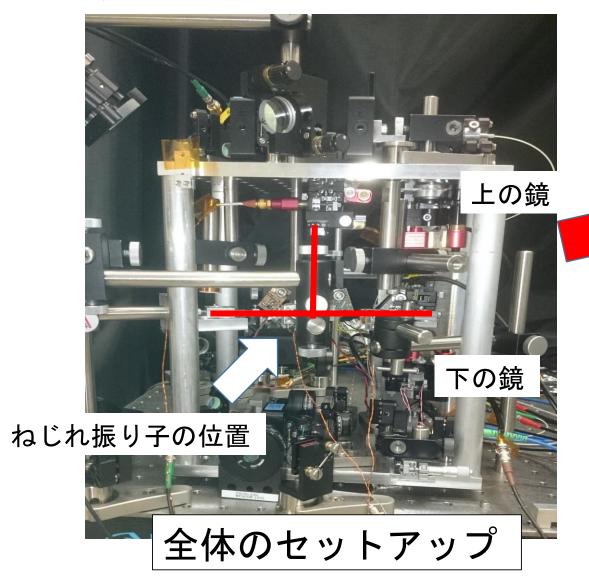


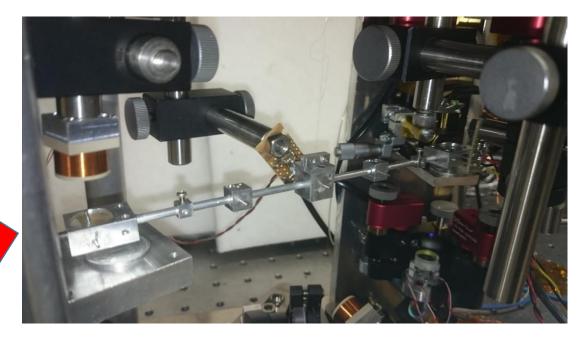
③ねじれ振り子のYAW方向の共振周波数測定→取り組み中



④水平方向の安定性検証

#### 実験セットアップ

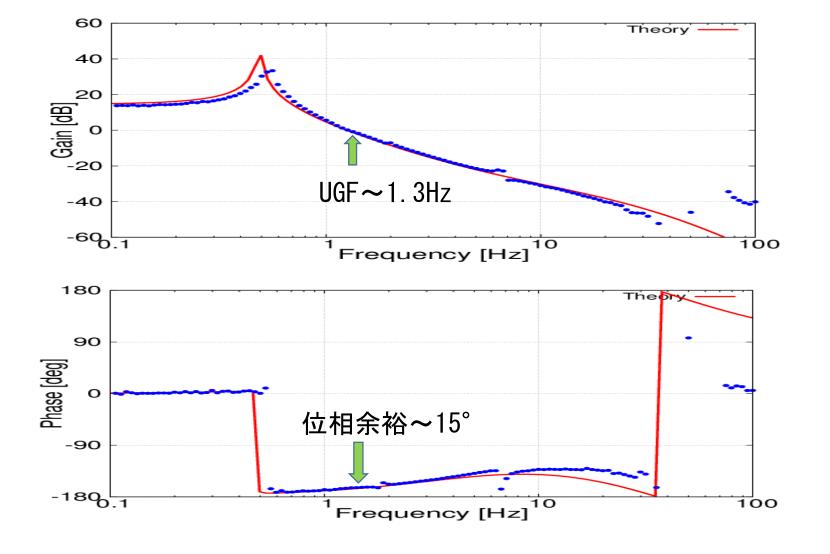




ねじれ振り子拡大図

真空槽には入れず、まずは大気中で実験

#### 結果 (ROLL方向のオープンループ伝達関数)



UGF~1. 3Hz 位相余裕~15°

安定した制御になった