

光輻射圧による 鏡の光学浮上技術の開発(3)

東大宇宙線研、東大理^A、東北大学際研^B、東北大通研^C
長野晃士、和田祥太郎^A、川崎拓也^A、道村唯太^A、
牛場崇文、松本伸之^{B,C}、安東正樹^A



概要

- 干渉計による重力波検出や巨視的量子力学の検証の際に問題となる懸架系熱雑音を回避するために、サンドウィッチ型光学浮上という方法を提案した。
- 現在我々は、この構成によるmgスケールの微小鏡の安定浮上の実験的実証に向けた研究を行っている。
- 本講演では、今後の具体的な研究計画を示す。
- また、光学浮上の要となる微小鏡の特性、特に曲率半径測定の進捗状況を示す。

目次

1. イントロダクション
2. 研究計画
3. 浮上用微小鏡の特性評価
4. まとめ

目次

1. イン트로ダクション
2. 研究計画
3. 浮上用微小鏡の特性評価
4. まとめ

イントロダクション

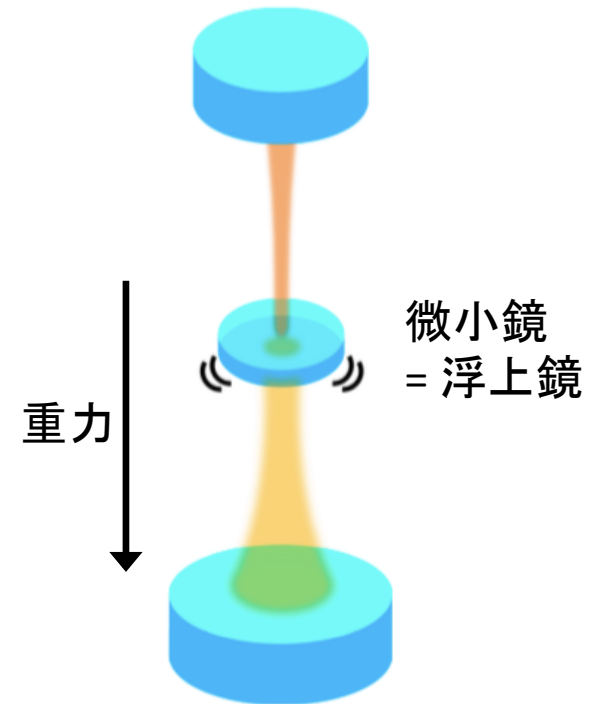
- 我々は、世界初のmgスケールの巨視的な系における量子力学の検証や、重力波検出における量子雑音低減方法の実証のための実験を行っている。
- 特に我々は、サンドウィッチ型光学浮上によって微小鏡を支持することで懸架系熱雑音を導入を回避するなどの工夫により古典雑音の低減することで、標準量子限界への到達を目指している。

イントロダクション

サンドウィッチ型光学浮上

- 曲率を持った微小鏡 (~ 1 mg)
を、適切な共振器長を持った
共振器で挟むことで、微小鏡
が自発的に安定した状態で浮
上する。
- 標準量子限界に到達可能。
- 理論的には実証されている [1]
が、実験的には未実証。
-> 実験的に実証する必要がある。

[1] Y. Michimura et al., *Opt. Express*, 2017.



サンドウィッチ型
光学浮上の概念図。

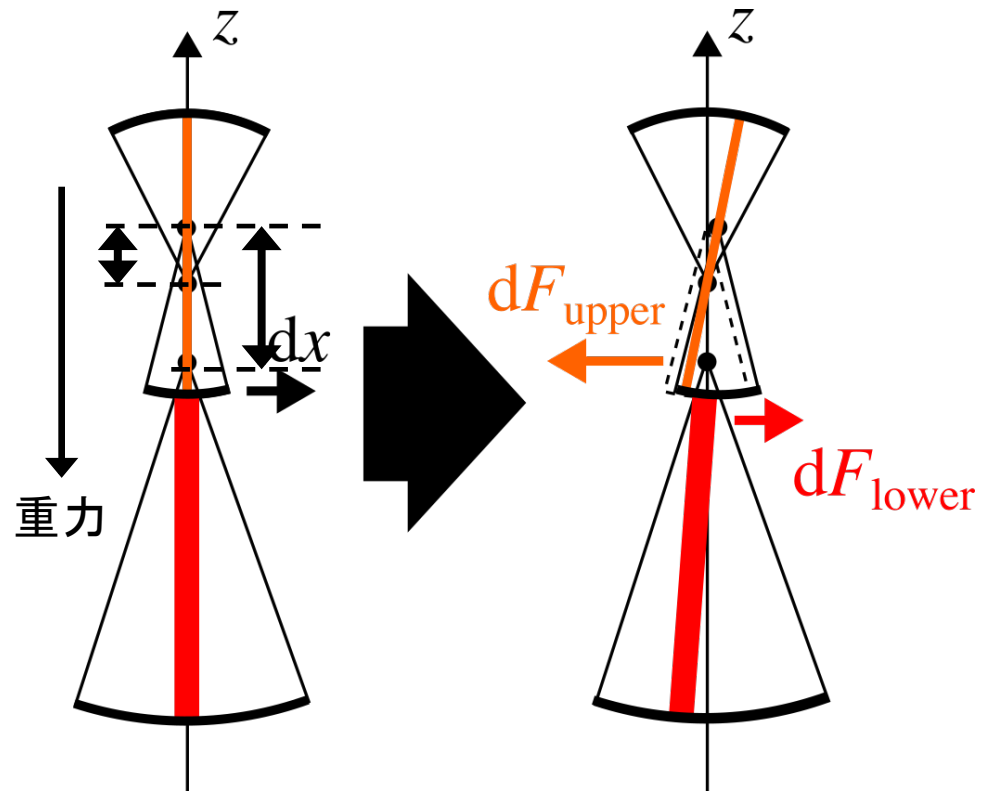
イントロダクション

サンドウィッチ型光学浮上における水平方向安定性

ポイント

1. 浮上のために下側の共振器内パワーの方が大きい。
2. 浮上鏡に曲率がある。
3. 上側の共振器の曲率中心間の距離を下側に比べて近づける。

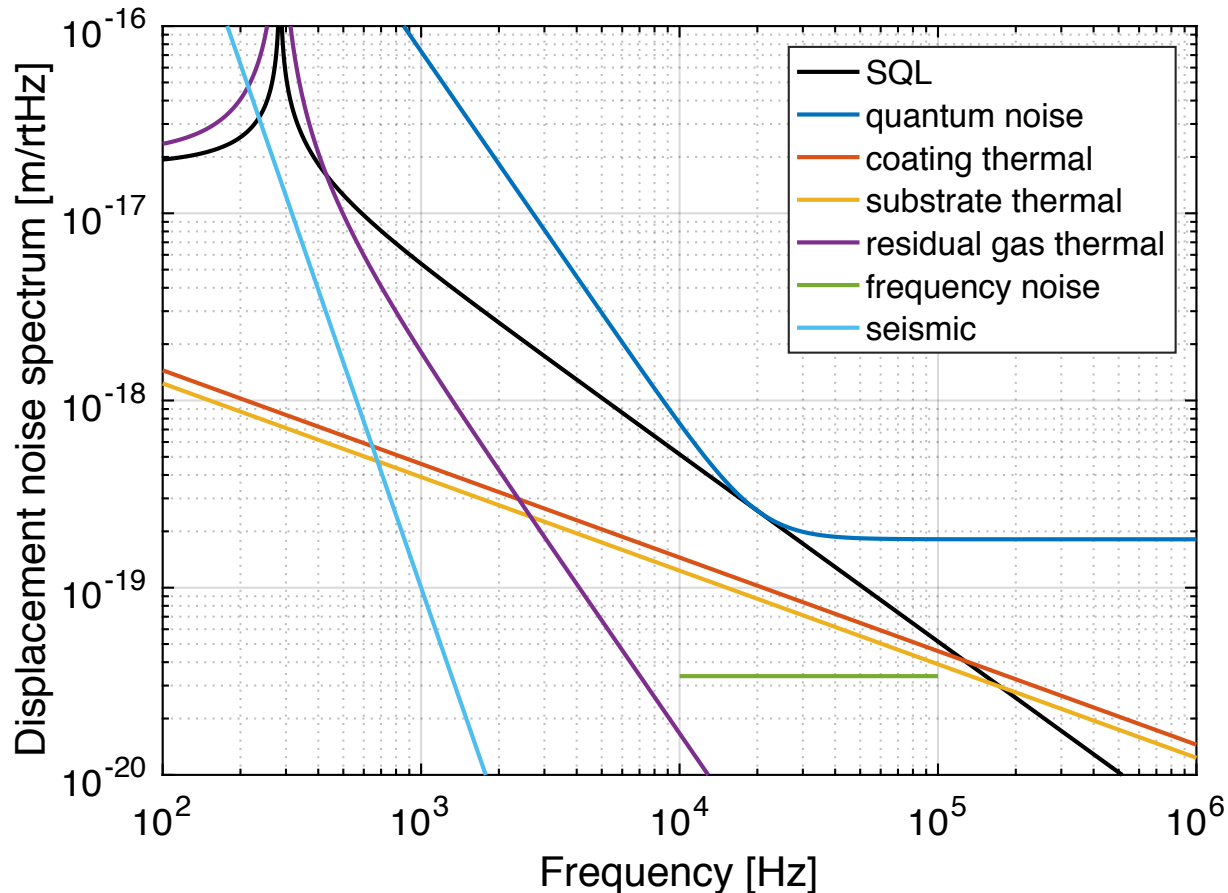
→ すると、浮上鏡が水平にずれた時に、上側共振器の共振器軸の方が大きく傾き、全体としては復元力がはたらくことになる。



サンドウィッチ型光学浮上の水平方向安定性の模式図。

イントロダクション

- サンドウィッチ型光学浮上実験の感度



サンドウィッチ型光学浮上実験における感度曲線の例。

目次

1. イントロダクション
2. 研究計画
3. 浮上用微小鏡の特性評価
4. まとめ

研究計画

光学浮上実験の研究計画

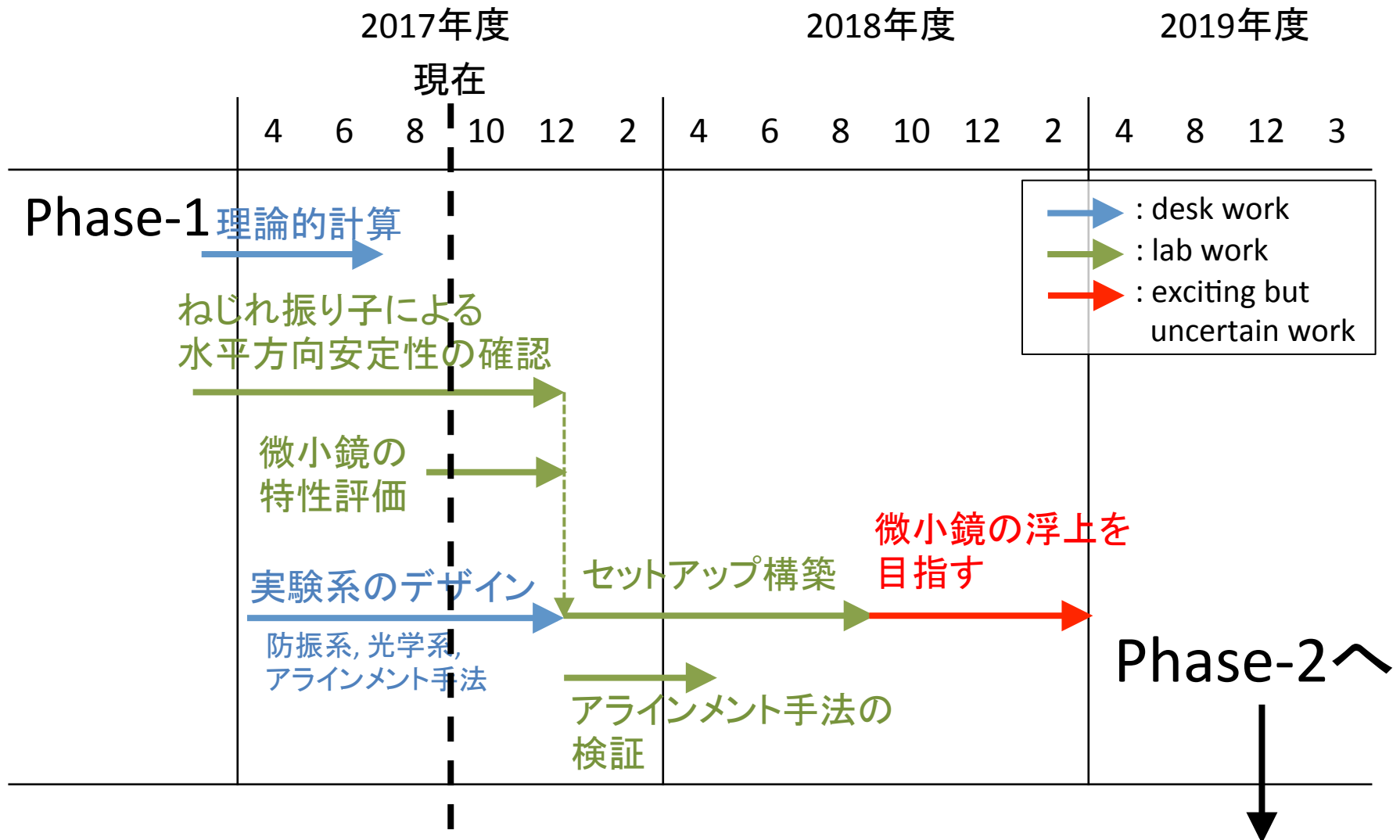
- Phase-1 (現在): 光学浮上の原理検証 (感度の要求なし)
 - サンドウィッチ型光学浮上の安定性の検証
 - 理論的計算
 - ねじれ振りをを使った水平方向復元力の検証
 - 浮上可能な実験セットアップの構築
 - 微小鏡の製作と特性評価
 - 防振装置の設計
 - アライメント技術の確立
- Phase-2: 標準量子限界への到達
 - 感度計算と得られるサイエンスの検討
 - 高度なレーザー安定化システムの構築
 - 低熱雑音鏡の製作
- Phase-3: 巨視的量子力学の検証と量子雑音低減法の開発
 - ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計の構築

研究計画

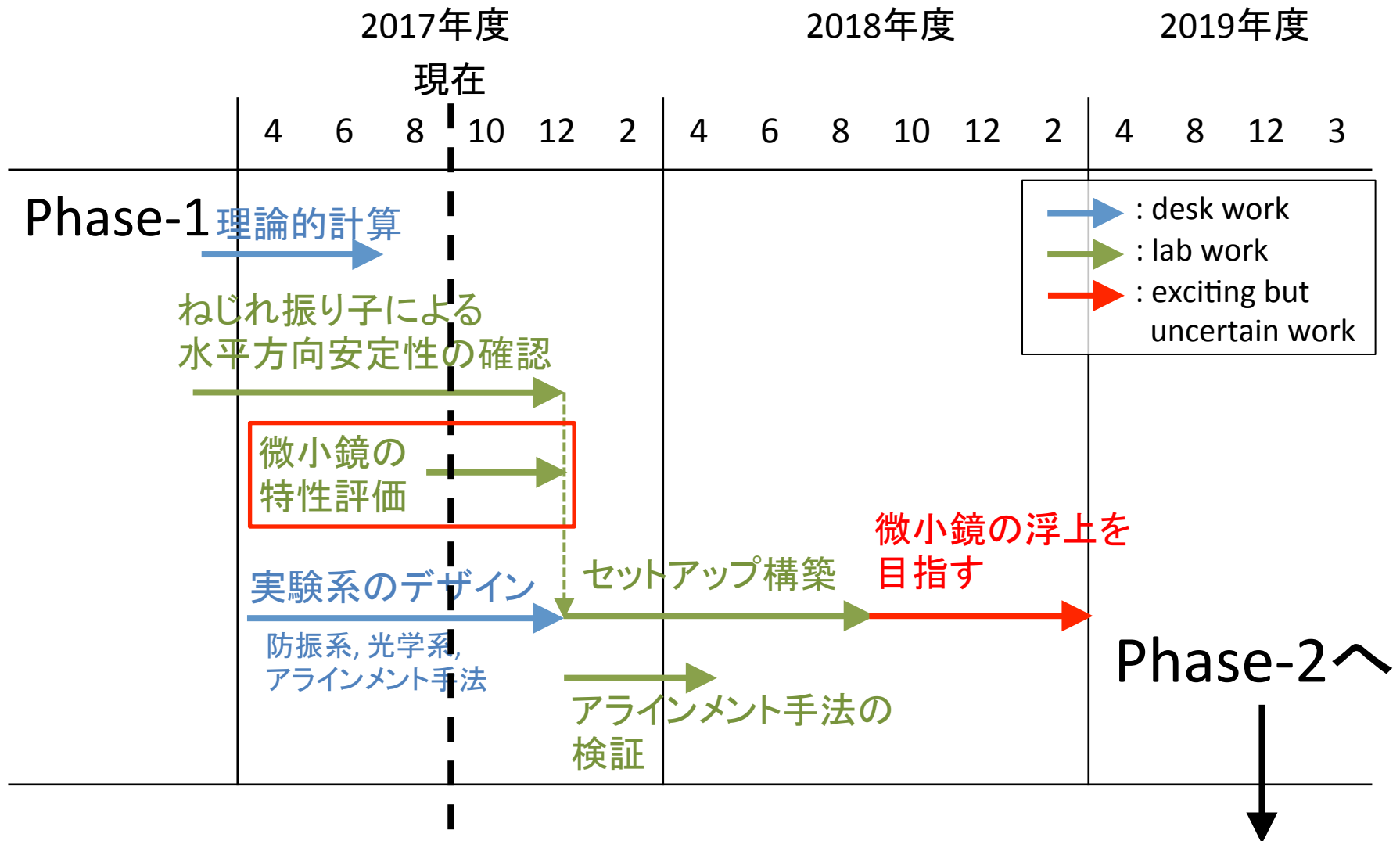
光学浮上実験の研究計画

- Phase-1 (現在): 光学浮上の原理検証 (感度の要求なし)
 - サンドウィッチ型光学浮上の安定性の検証
 - 理論的計算 ◎
 - ねじれ振りをを使った水平方向復元力の検証 ← 和田くんの発表
 - 浮上可能な実験セットアップの構築 [13pU34-7]
 - 微小鏡の製作と特性評価 ← 私の発表
 - 防振装置の設計 ○?
 - アライメント技術の確立 △
- Phase-2: 標準量子限界への到達 [21aA19-9、岩手大学]
 - 感度計算と得られるサイエンスの検討 ◎ ← 道村さんの発表
 - 高度なレーザー安定化システムの構築 ← 川崎くんの発表
 - 低熱雑音鏡の製作 × [13pU34-8]
- Phase-3: 巨視的量子力学の検証と量子雑音低減法の開発
 - ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計の構築 ×

研究計画

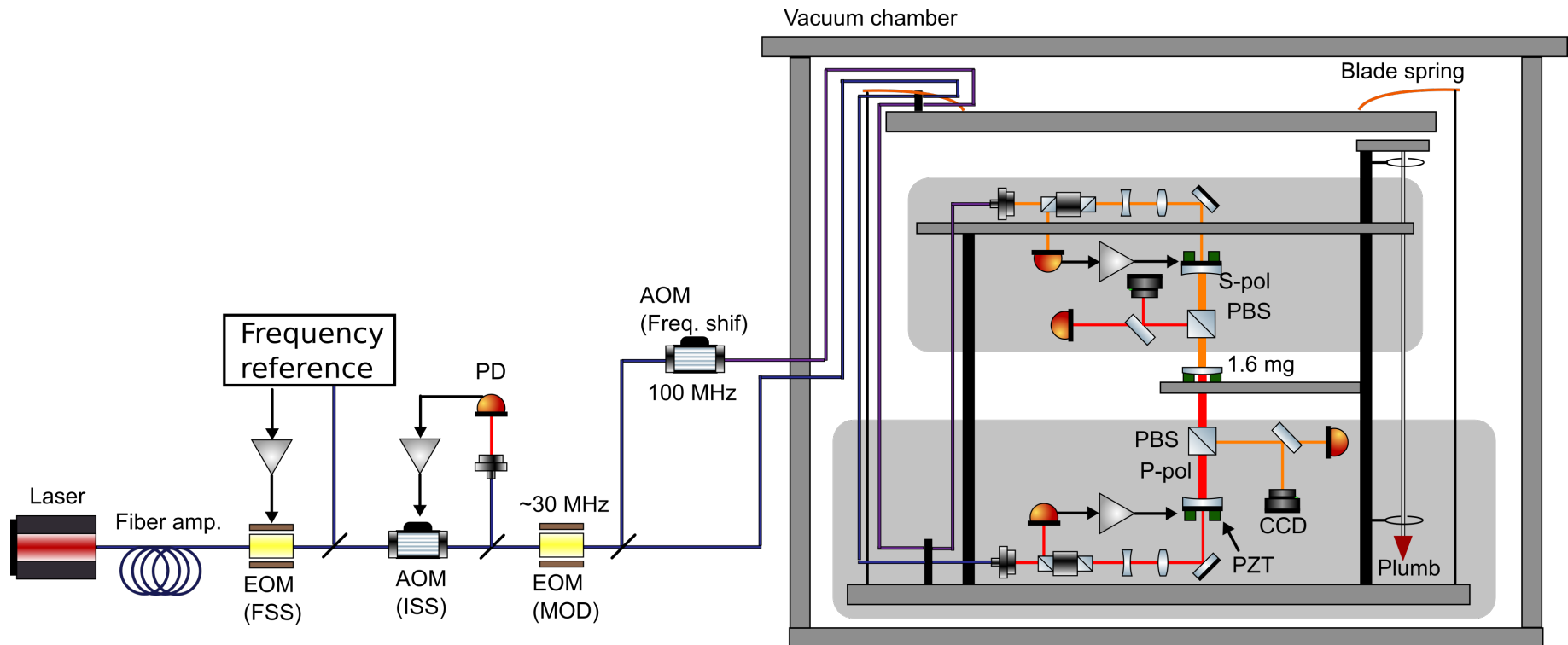


研究計画



研究計画

• 光学浮上の原理検証のための実験セットアップ

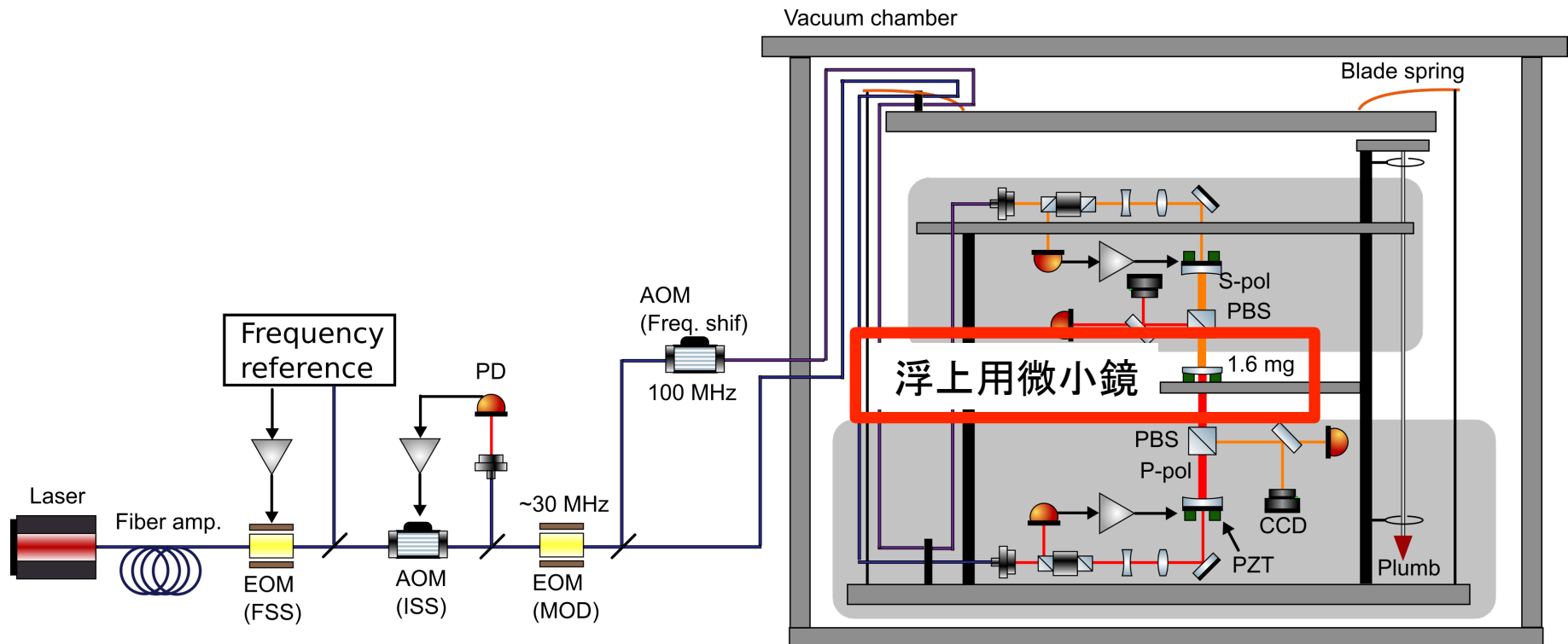


- 波長: 1064 nm
- 共振器フィネス: 700 (上下とも)
- 入射パワー: 8.5 W (下側)
2.6 W (上側)

- 微小鏡質量: 1.6 mg
- 直径 3 mm, 厚さ 0.1 mm
- 曲率半径 30 mm (平凸鏡)

研究計画

• 光学浮上の原理検証のための実験セットアップ



- 波長: 1064 nm
- 共振器フィネス: 700 (上下とも)
- 入射パワー: 8.5 W (下側)
2.6 W (上側)

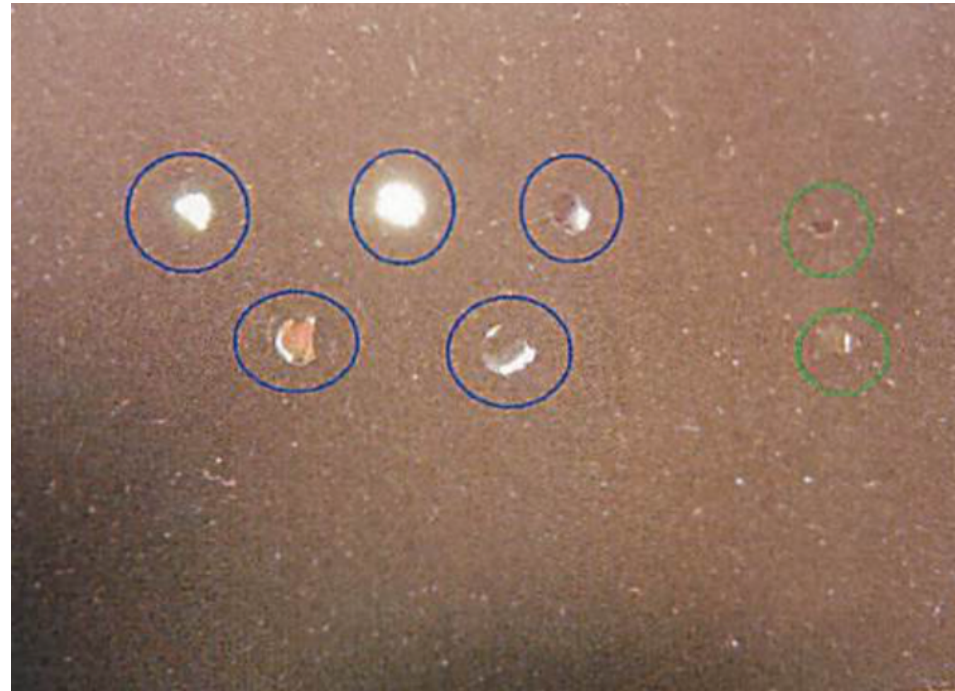
- 微小鏡質量: 1.6 mg
 - 直径 3 mm, 厚さ 0.1 mm
 - 曲率半径 30 mm (平凸鏡)

目次

1. イントロダクション
2. 研究計画
3. 浮上用微小鏡の特性評価
4. まとめ

微小鏡の特性評価

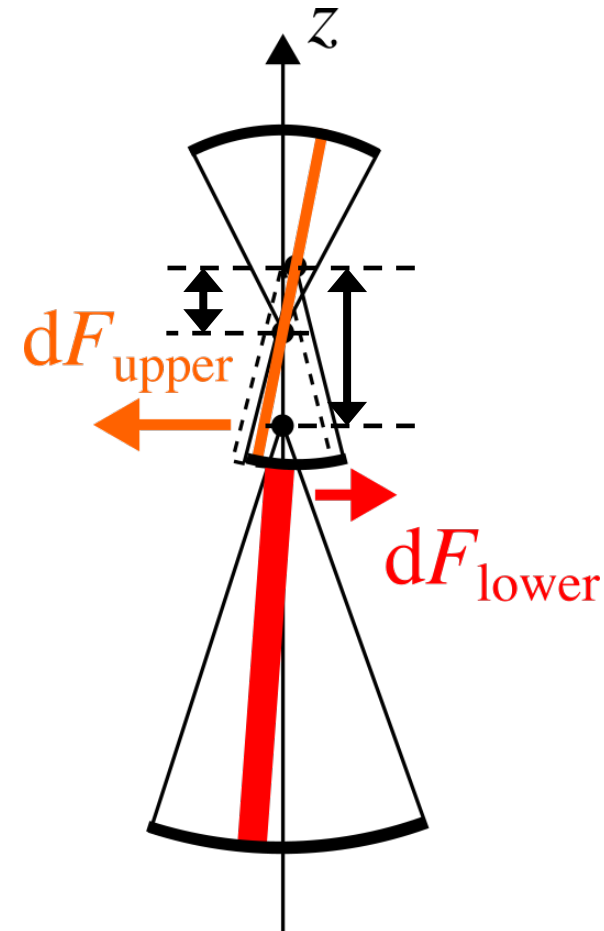
- 微小鏡の設計値
 - 質量: 1.6 mg (直径: 3 mm、厚さ: 0.1 mm)
 - 曲率半径: 30 mm (平凸)
 - 強度反射率: 0.9995
- 微小鏡は既に納品されているが、このような小さい鏡は特性評価が難しい。
 - 製作も難しかったため、欠けなく納品されたのは1枚のみ。



コーティング後の微小鏡の写真。7枚中1枚のみ欠けがない。
7枚中4枚は一部が、7枚中2枚は半分以上欠けている。

微小鏡の特性評価

- 特に難しいのは曲率半径の評価
 - メーカーの仕様値で、 30 ± 10 mm ($\sim 30\%$ の精度)
 - 原器を当ててNewtonリングで確認
- サンドウィッチ型光学浮上を実現するためには、上下の共振器の鏡同士の曲率中心間の距離の調整が重要。
- 装置全体の設計のために、1 mm程度の精度 ($\sim 3\%$) で曲率半径を知りたい。



サンドウィッチ型光学浮上の水平方向安定性の模式図。

微小鏡の特性評価

微小鏡の曲率測定方法

1. 反射光のビームプロファイルを測定
 - 測定方法がシンプル。
 - 測定精度が悪い。
2. 共振器に組み込んで曲率を測定
 - キャビティースキャンにより、基本モードと高次モードの間隔を測定する。
 - 測定精度が高い。
 - ある程度曲率が分かっていないと適切な共振器を組むことができない。

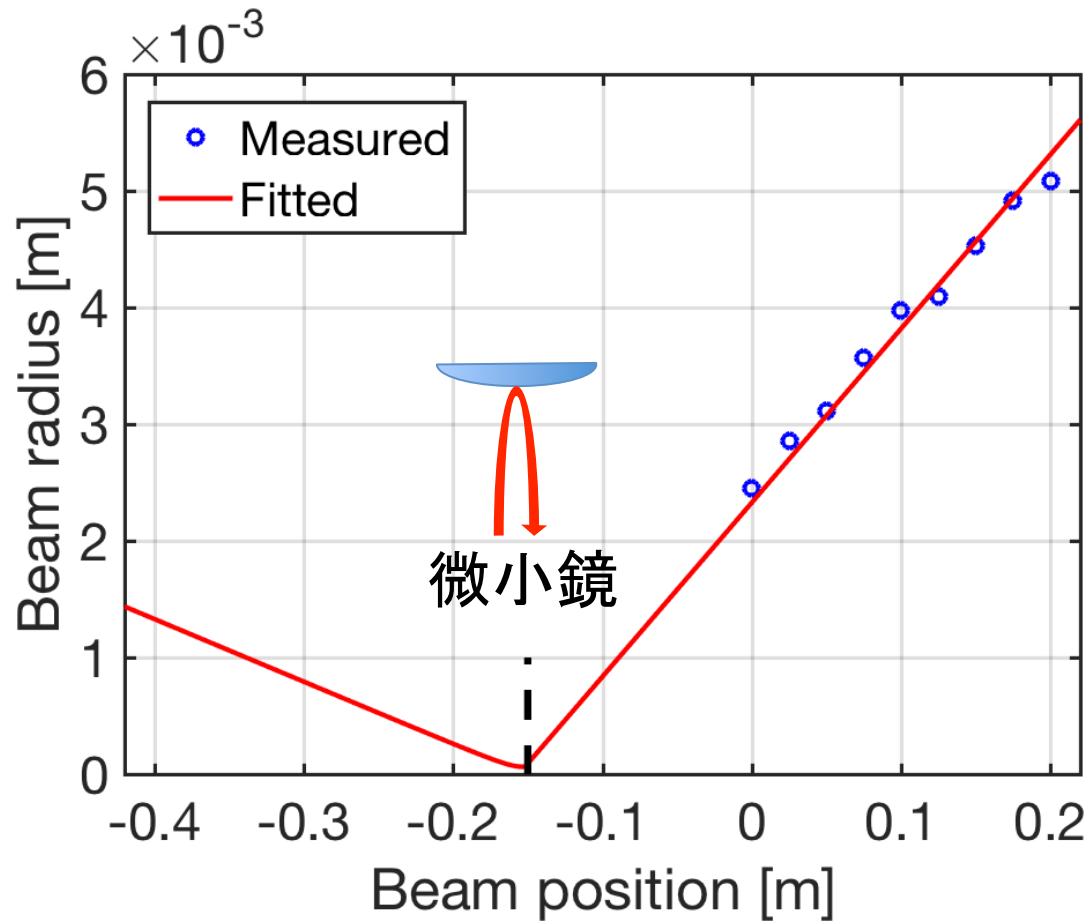
微小鏡の特性評価

微小鏡の曲率測定方法

1. 反射光のビームプロファイルを測定
 - 測定方法がシンプル。
 - 測定精度が悪い。
2. 共振器に組み込んで曲率を測定
 - キャビティースキャンにより、基本モードと高次モードの間隔を測定する。
 - 測定精度が高い。
 - ある程度曲率が分かっていると適切な共振器を組むことができない。

微小鏡の特性評価

微小鏡の反射光のビームプロファイルを測定



→ 微小鏡の曲率 = 17 ± 5 mm

微小鏡の特性評価

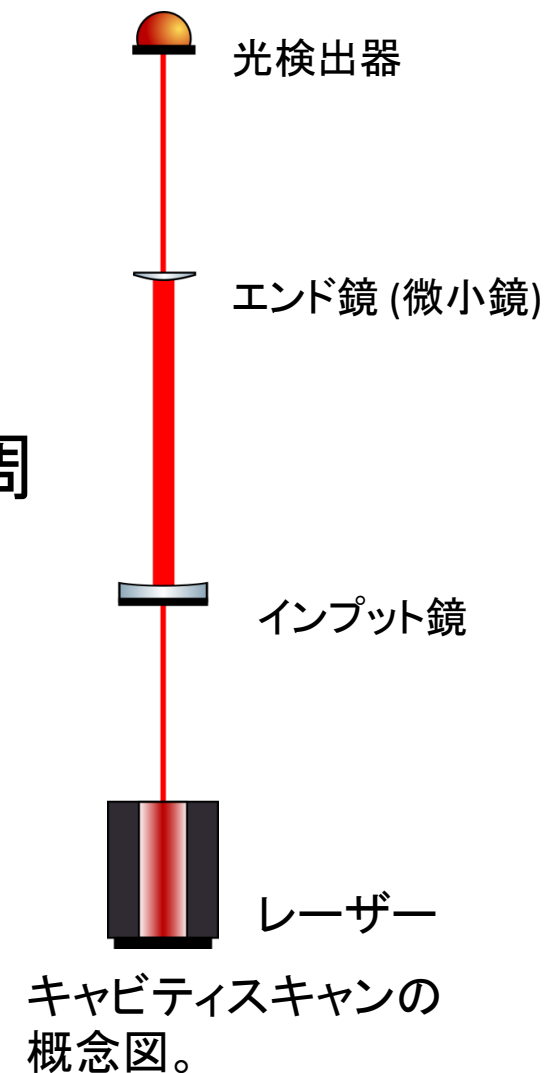
微小鏡の曲率測定方法

1. 反射光のビームプロファイルを測定
 - 測定方法がシンプル。
 - 測定精度が悪い。
2. 共振器に組み込んで曲率を測定
 - キャビティースキャンにより、基本モードと高次モードの間隔を測定する。
 - 測定精度が高い。
 - ある程度曲率が分かっていないと適切な共振器を組むことができない。

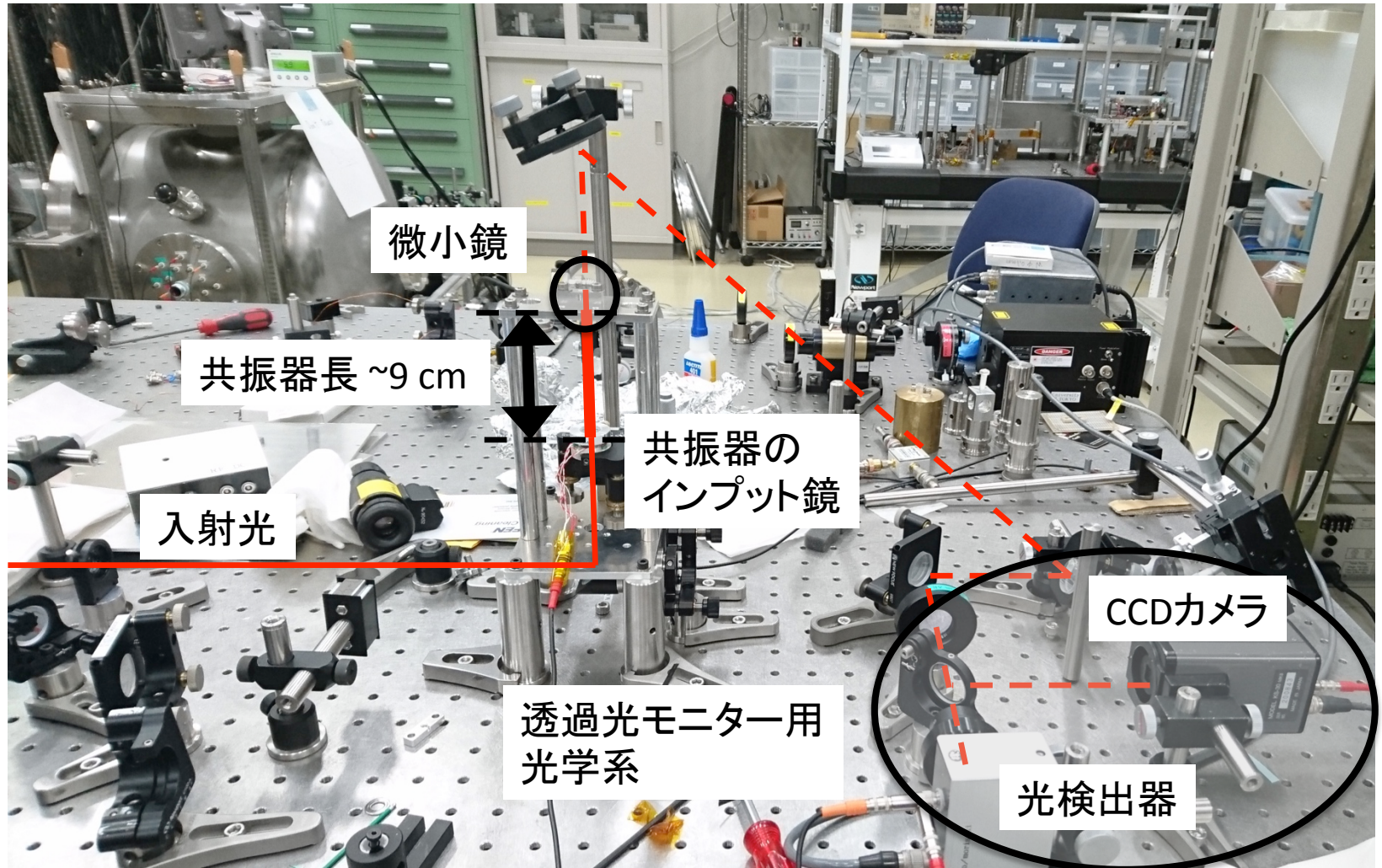
微小鏡の特性評価

共振器を使った微小鏡の曲率測定

- 共振器に微小鏡を組み込んで曲率を測定する。
 - 測定方法: キャビティースキャン(共振器を組み、入射するレーザーの周波数をシフトさせながら透過光強度を測定)により、基本モードと高次モードの間隔を測定する。
 - 測定精度が高い。



微小鏡の特性評価

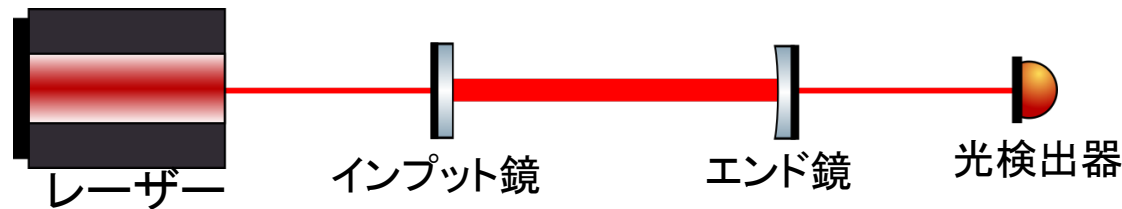


微小鏡の特性評価

共振器による微小鏡の曲率測定

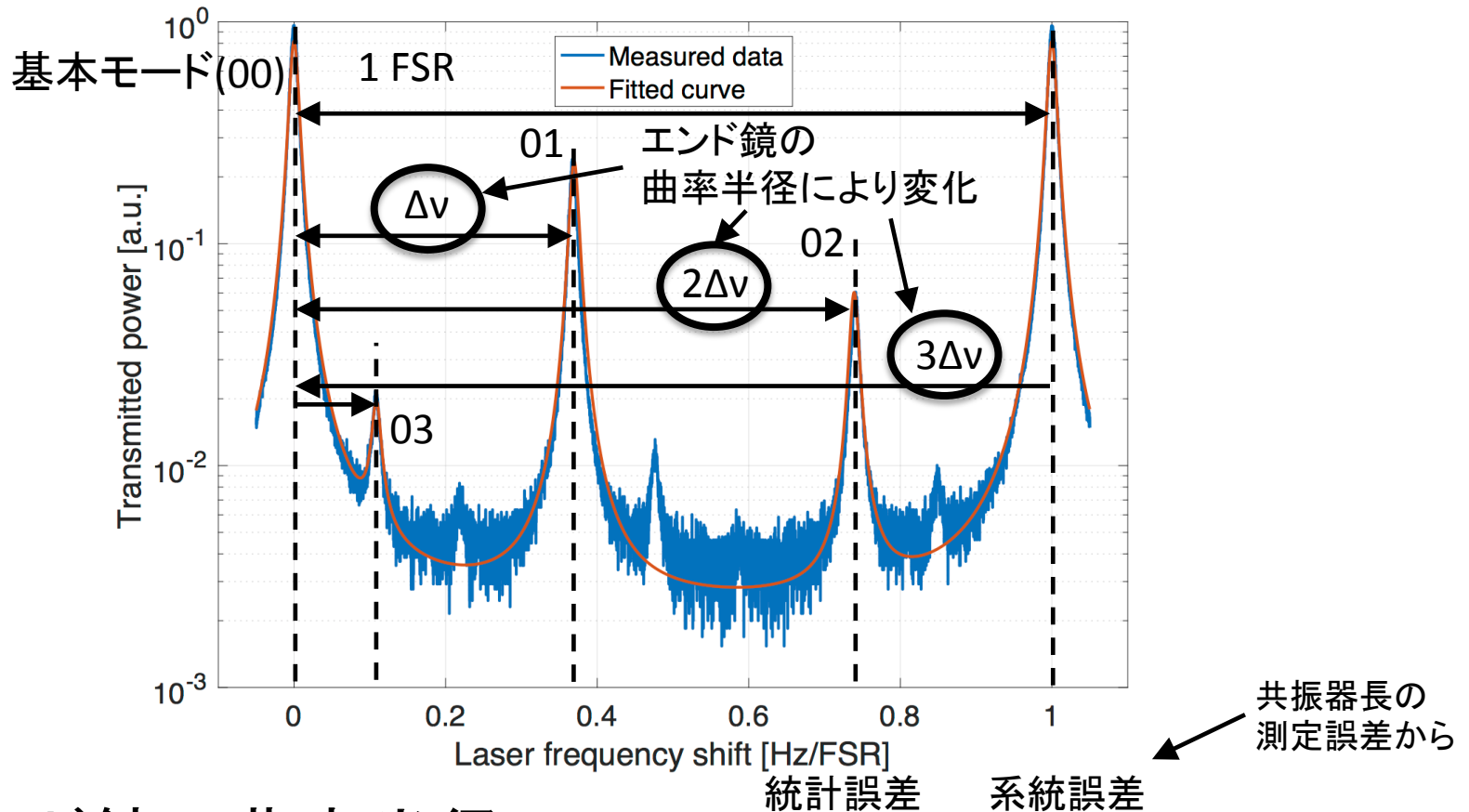
- まず、この測定方法の測定精度を確認するためのテスト測定を行った。
- テスト測定のセットアップ
 - インプット鏡: 平面鏡、反射率 0.94
 - エンド鏡: 曲率半径 10 cm、反射率 0.975
 - 共振器長: 8.37 +/- 0.10 cm (定規で測定)
 - FSR = 1.79 GHz
 - アクチュエータ: レーザーの温調 (効率 -3 GHz/V)

どちらの鏡も
ホルダーに固定



テスト測定概念図。

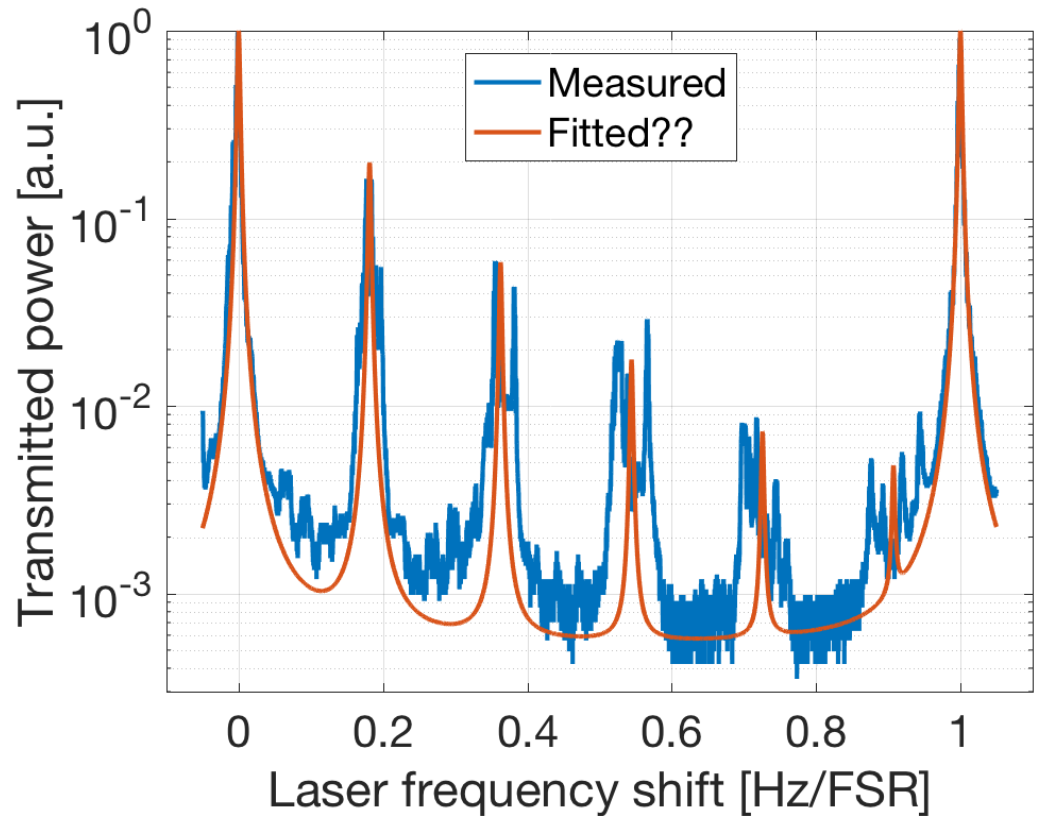
微小鏡の特性評価



- エンド鏡の曲率半径: $9.96 \pm 0.09 \pm 0.12$ cm
 -> ~2%の精度 (注: インพุット鏡は平面と仮定)
 -> 微小鏡の測定でも要求精度 (3%) を達成可能。

微小鏡の特性評価

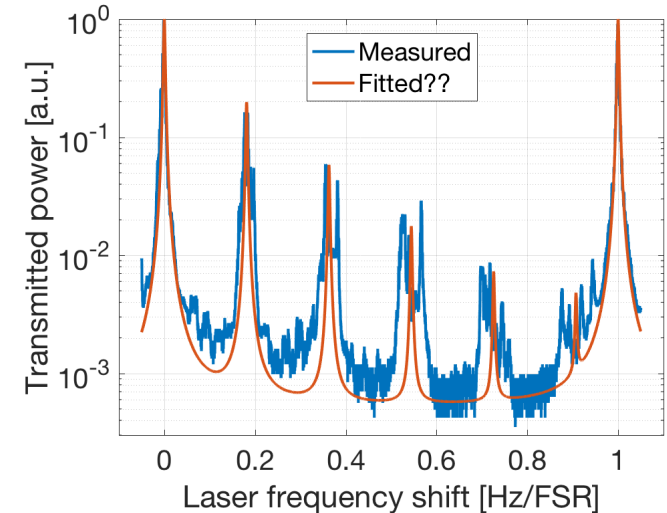
- 測定精度が十分であることが確認できたので、実際に微小鏡の共振器を用いた曲率測定を行った。
- 測定セットアップ
 - インพุット鏡
 - 曲率半径 10.0 ± 0.2 cm
 - 反射率 0.975
 - エンド鏡
 - 微小鏡 (反射率 0.9995)
 - 共振器長: 8.93 cm
 - アクチュエータ:
レーザーの温調



微小鏡を持つ共振器のキャビティスキャンの結果。

微小鏡の特性評価

- しかし、高次モードのピークの幅が広がってしまっている。
 - スweepが遅すぎる?
 - 微小鏡を固定していない影響?
 - 軸によって曲率が異なる?
- 微小鏡の曲率半径 (高次モードの幅を誤差として、共振ピークがその中央になるようにフィッティングした場合)
 - 1.59 ± 0.05 cm (メーカー仕様値: 3 ± 1 cm)
 - 系統誤差の評価はまだ。



(再掲)微小鏡を持つ共振器のキャビティスキンの結果。

目次

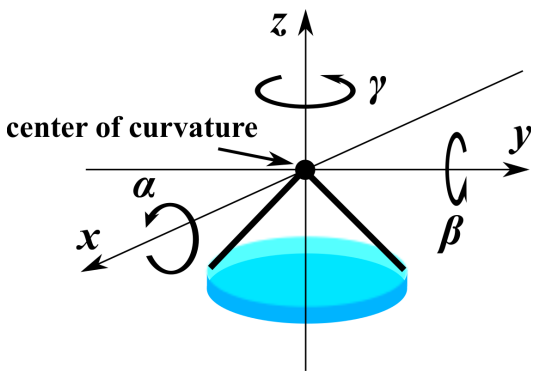
1. イントロダクション
2. 研究計画
3. 浮上用微小鏡の特性評価
4. まとめ

まとめ

- 現在我々は、標準量子限界到達を目指し、サンドウィッチ型光学浮上の実験的実証をすすめている。
- その実証に向けた課題をあげるとともに、具体的なスケジュールを提案した。
- サンドウィッチ型光学浮上実現の要となる微小鏡の特性評価、特に曲率半径測定実験を行っている。
 - キャビティースキャンにより、必要な精度(約2%)で測定ができることを確認した。
 - 微小鏡を使った共振器のキャビティースキャンにより、曲率半径は 1.59 ± 0.05 cmと測定された。
 - さらなる評価は必要。
- 今後、曲率を考慮に入れた実験セットアップを構築し、実際にサンドウィッチ型光学浮上の原理実証を行う。

補遺

自由度と安定性

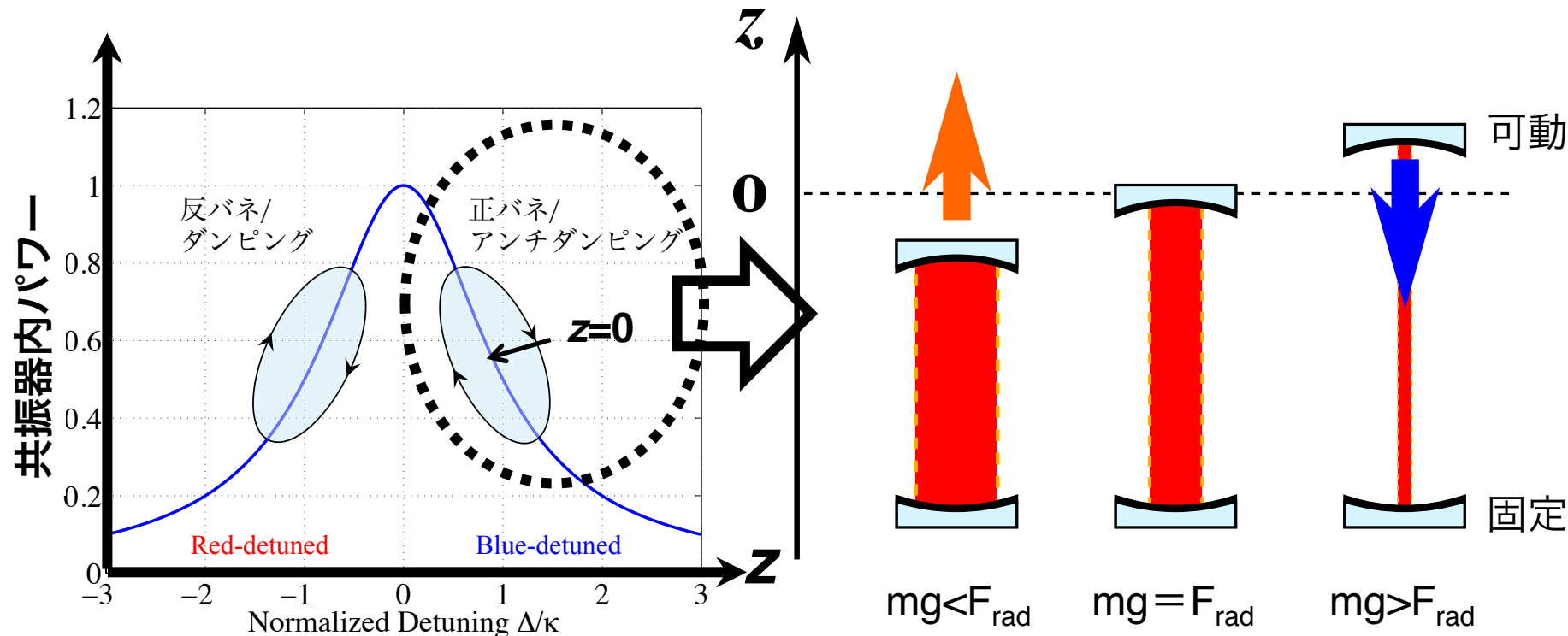


➤ 浮上鏡の曲率中心の運動（並進3自由度，回転3自由度）

自由度	水平(x,y)並進	鉛直(z)並進	x, y軸回転	z軸回転
復元力	サンドイッチ構成の復元力	光バネ	重力	なし
模式図	A schematic diagram showing a cross-section of the lens system. A yellow line represents the lens surface, and a red line represents the lens body. A horizontal displacement dx is indicated. Forces dF are shown acting on the lens surface.	A schematic diagram showing three vertical red lines representing the lens body. A red circle with the character '済' (済) is above the middle line. A blue arrow points downwards from the top of the middle line.	A schematic diagram showing a cross-section of the lens system. A vertical z-axis is shown. A horizontal displacement $d\beta$ is indicated. A force mg is shown acting downwards from the center of the lens.	A schematic diagram showing a top-down view of the lens system. A vertical z-axis is shown. A blue circle with the character '済' (済) is above the lens. A yellow arrow points downwards from the center of the lens.

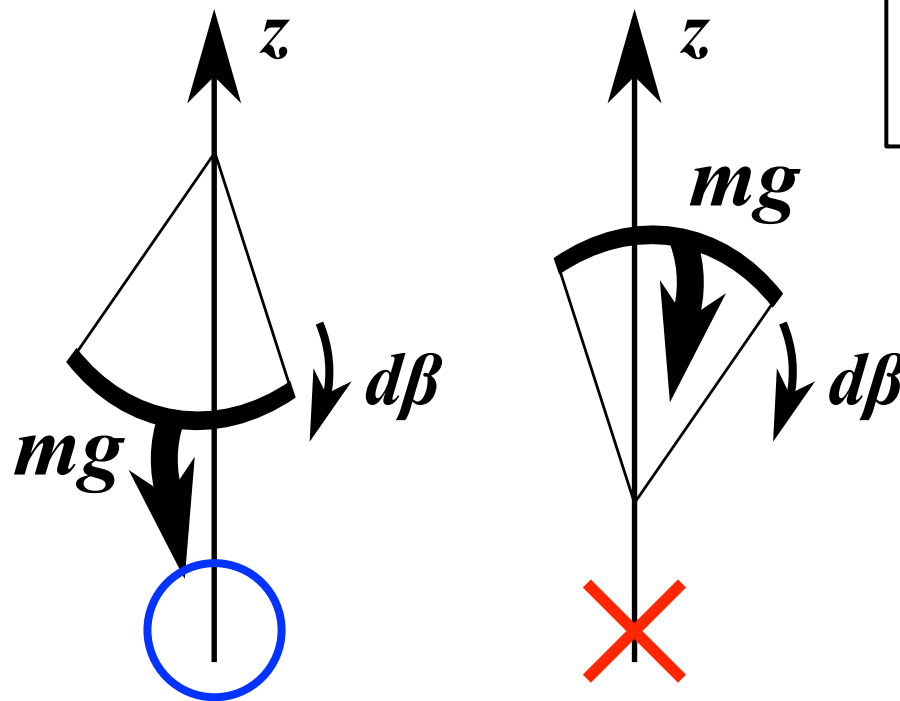
光バネ

- 共振器長を共振点からずらした位置 ($z=0$) に制御
→ 変位に対して共振器内パワーが変化
→ 「光バネ」



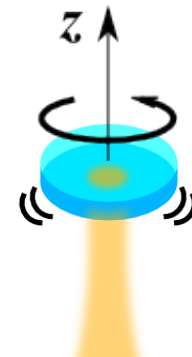
回転運動の安定性

- 曲率中心まわりの x, y 軸回転
- ビームスポット位置は不変 $\rightarrow$ 重力のみ考慮

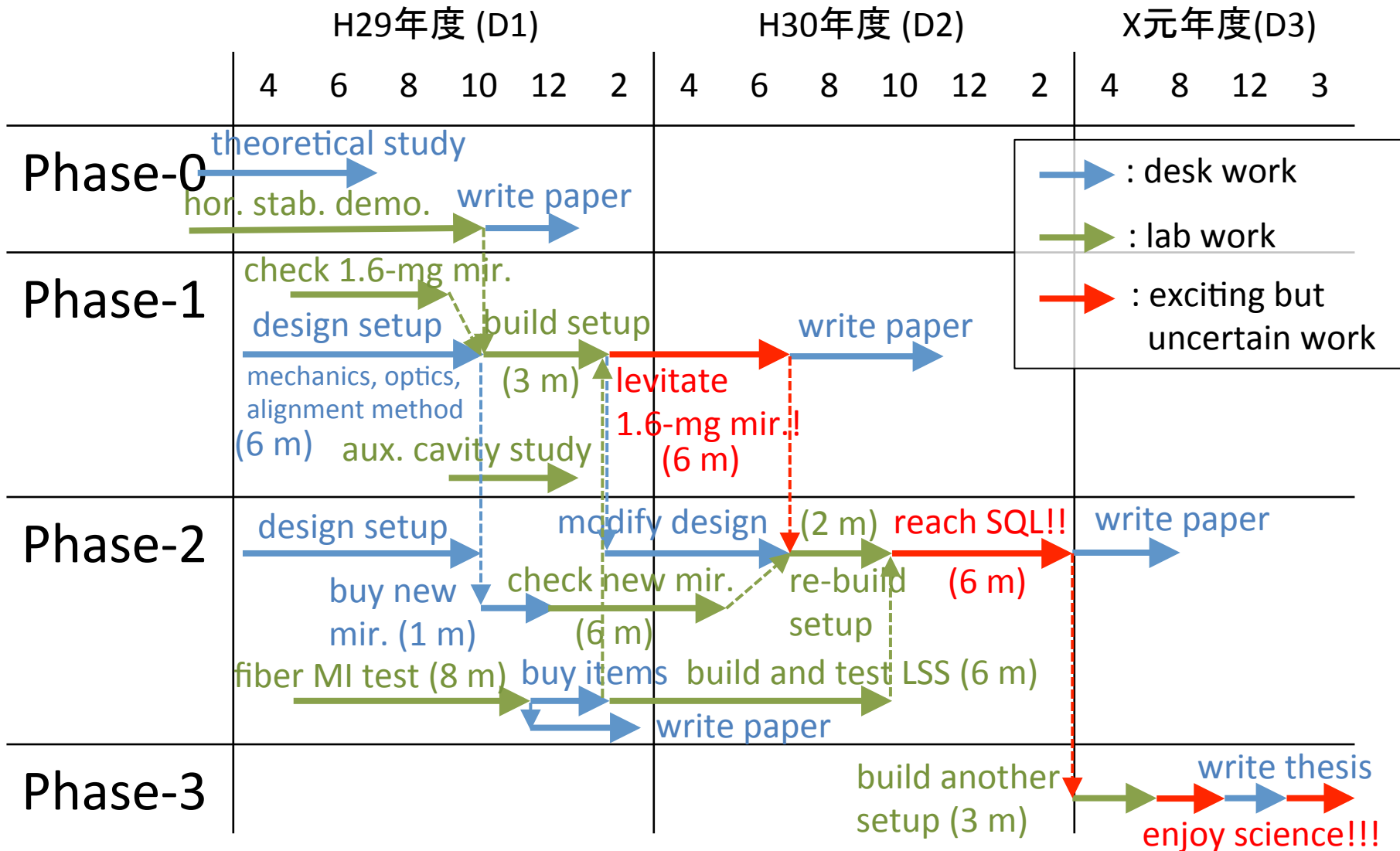


浮上鏡は下に凸が必要

z 軸回転
安定性には無関係



Schedule



Applications of optical levitations

光学浮上の応用先

Y. Michimura,
Seminar slide

- 古典力学と量子力学を繋ぐモデルの検証
R. Penrose: [Gen. Rel. Grav. 28, 1572 \(1996\)](#)
A. Bassi+: [Rev. Mod. Phys. 85, 471 \(2013\)](#)
- 重力デコヒーレンスの観測
R. Kaltenbaek+: [Experimental Astronomy 34, 123 \(2012\)](#)
- 巨視的量子現象
エンタングルメント、Schrödingerの猫 etc.
- 超高精度力センサ($\sim 10^{-20}$ N/rtHz)
重力逆二乗則の検証、Casimir力
A. A. Geraci+: [PRL 105, 101101 \(2010\)](#)
重力波検出
A. Arvanitaki, A. A. Geraci: [PRL 110, 071105 \(2013\)](#)
- 量子情報的な応用(回転の自由度を利用)
- 重力波検出における量子雑音低減方法の実証

4

Applications of optical levitations

光学浮上の応用先

Y. Michimura,
Seminar slide

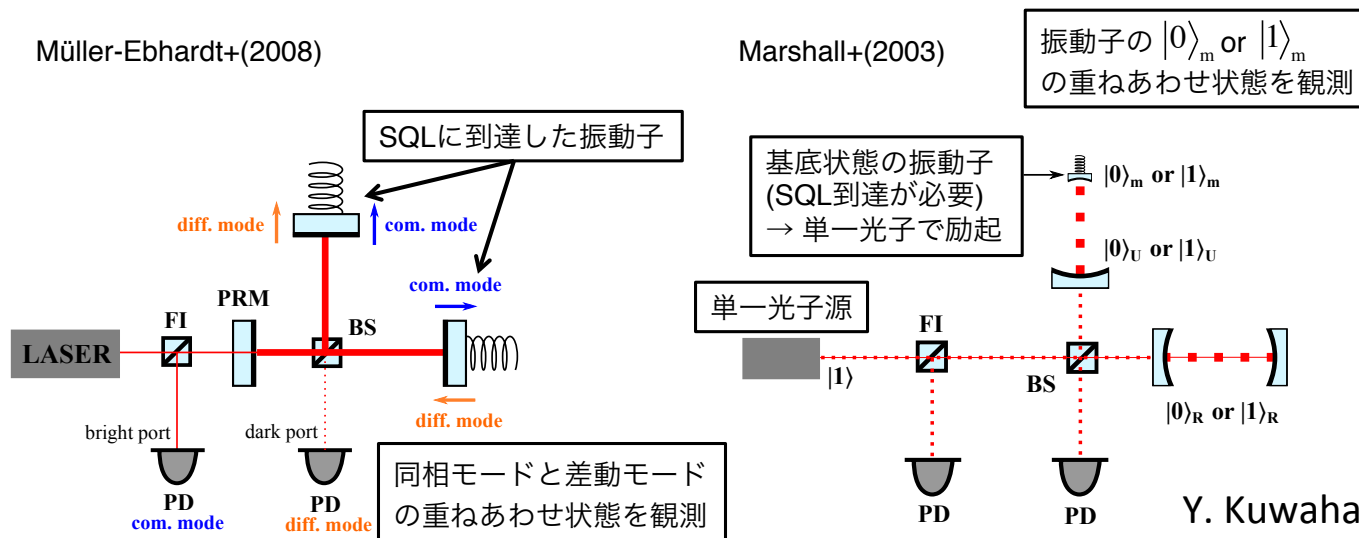
- 古典力学と量子力学を繋ぐモデルの検証
R. Penrose: [Gen. Rel. Grav. 28, 1572 \(1996\)](#)
A. Bassi+: [Rev. Mod. Phys. 85, 471 \(2013\)](#)
- 重力デコヒーレンスの観測
R. Kaltenbaek+: [Experimental Astronomy 34, 123 \(2012\)](#)
- 巨視的量子現象
エンタングルメント、Schrödingerの猫 etc.
- 超高精度力センサ($\sim 10^{-20}$ N/rtHz)
重力波検出
A. A. Geraci+: [PRL 105, 101101 \(2010\)](#)
重力波検出
A. Arvanitaki, A. A. Geraci: [PRL 110, 071105 \(2013\)](#)
- 量子情報的な応用(回転の自由度を利用)
- 重力波検出における量子雑音低減方法の実証

Test of macroscopic
quantum mechanics

Applications of optical levitations

提案されている検証方法

- 巨視的な物体では、直接二重スリット実験をする代わりにそれに相当する実験をし、重ね合わせが生じるかどうか検証する。
- SQLへの到達が必要条件



2016/01/27

修士論文審査会

Y. Kuwahara, Master thesis defense, University of Tokyo (2016)

Applications of optical levitations

光学浮上の応用先

Y. Michimura,
Seminar slide

- 古典力学と量子力学を繋ぐモデルの検証
R. Penrose: [Gen. Rel. Grav. 28, 1572 \(1996\)](#)
A. Bassi+: [Rev. Mod. Phys. 85, 471 \(2013\)](#)

- 重力デコヒーレンスの観測
R. Kaltenbaek+: [Experimental Astronomy 34, 123 \(2012\)](#)

- 巨視的量子現象
エンタングルメント、Schrödingerの猫 etc.

- 超高精度力センサ($\sim 10^{-20}$ N/rtHz)
重力逆二乗則の検証、Casimir力

A. A. Geraci+: [PRL 105, 101101 \(2010\)](#)

重力波検出

A. Arvanitaki, A. A. Geraci: [PRL 110, 071105 \(2013\)](#)

- 量子情報的な応用(回転の自由度を利用)

- 重力波検出における量子雑音低減方法の実証

Development
of the noise
reduction
technique and
GW detection

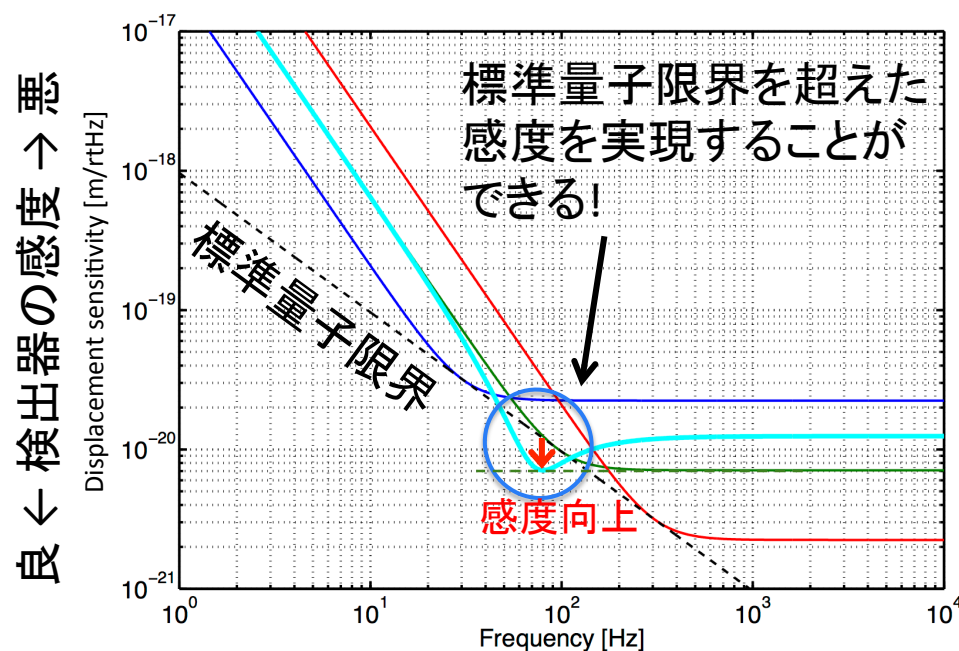
gravity
experiment

4

Applications of optical levitations

重力波検出器の量子雑音の低減

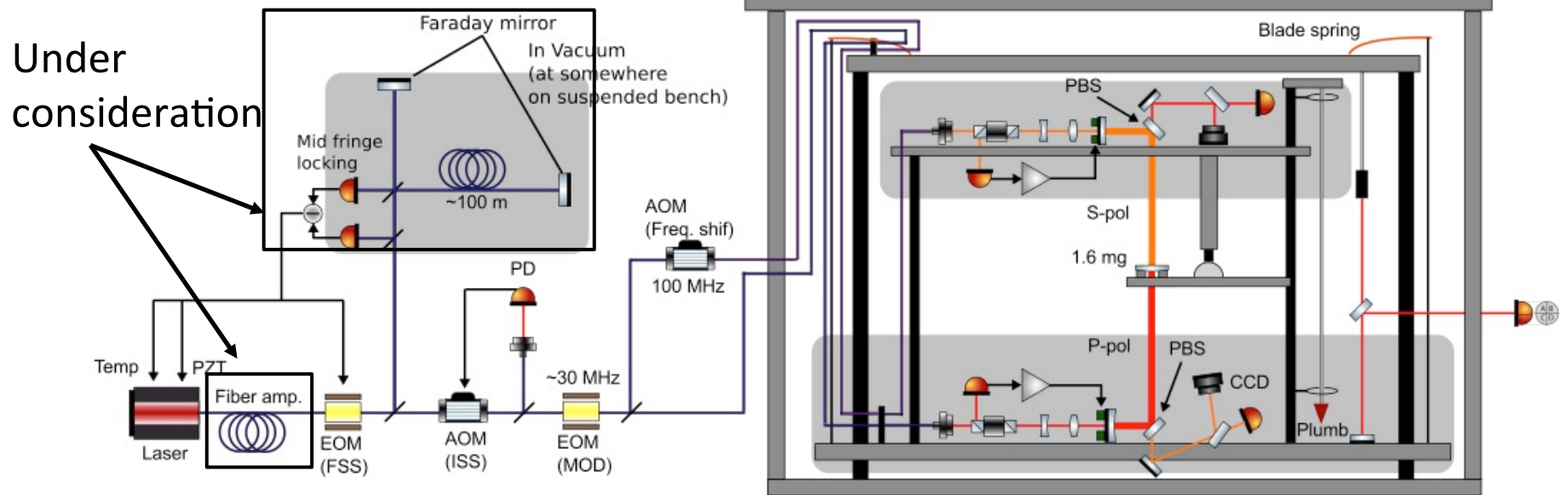
- ~~通常の~~ 重力波検出器の量子雑音
ホモダイン検波をしたときの



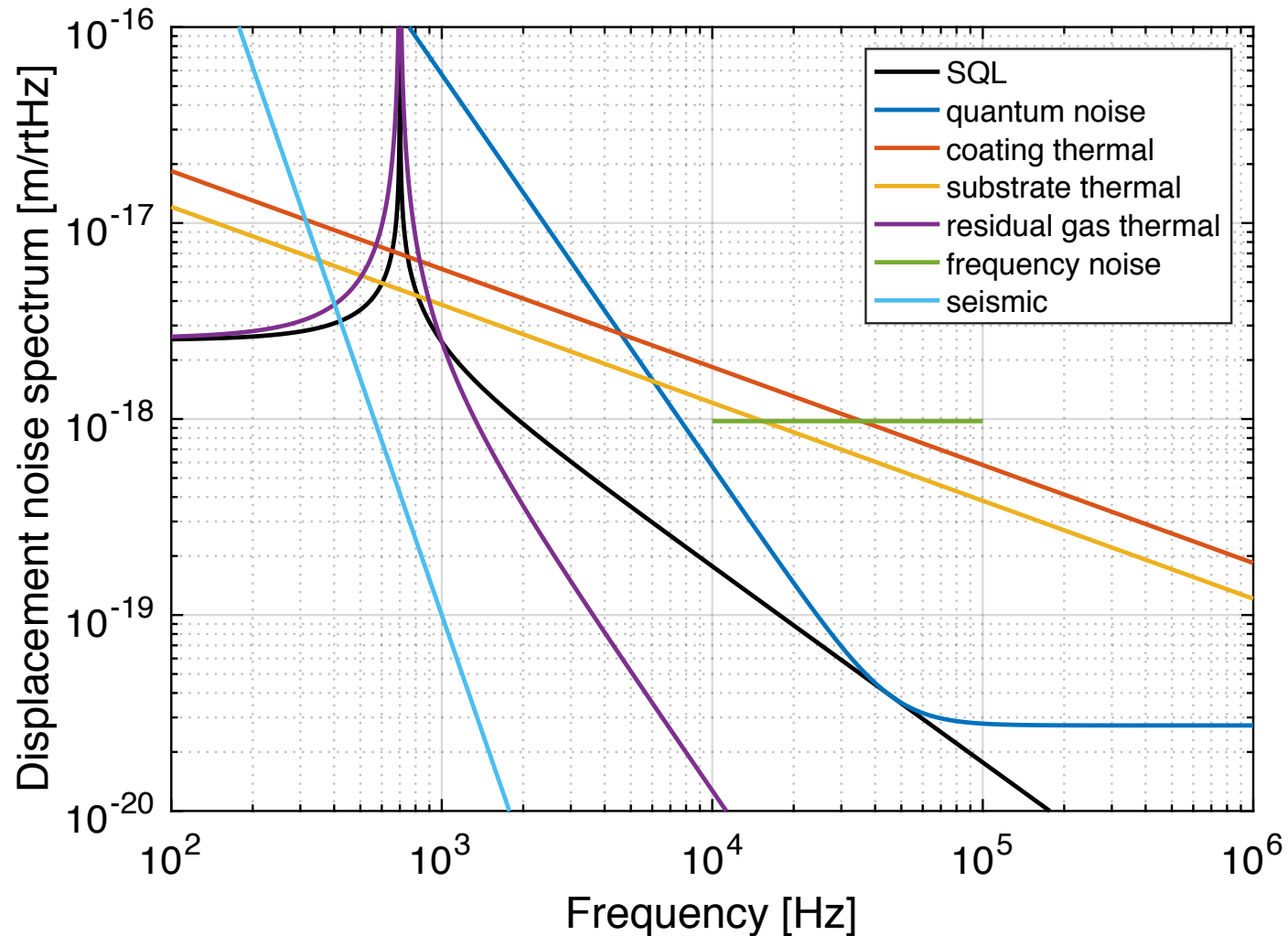
K. Nagano, Master thesis defense, University of Tokyo (2017)

Experimental configuration in Phase-1

- wave length: 1064 nm
- finesse: 700 (lower, upper)
- input power: 8.5 W (lower)
2.6 W (upper)
- int. reflectivity: 0.9995 (lev.)
0.992 (l, u)
- freq. noise: 5×10^{-3} Hz/rtHz
- suspension reso. freq.: ~ 4 Hz
- main cavity servo UGF: ~ 50 Hz(?)
- optical zenith angle < 0.02 deg
- pressure: 10^{-4} Pa
- lev. mirror mass: 1.6 mg (Being modified)
 - $\phi = 3$ mm, $t = 0.1$ mm
 - RoC = 30 mm (to be measured)

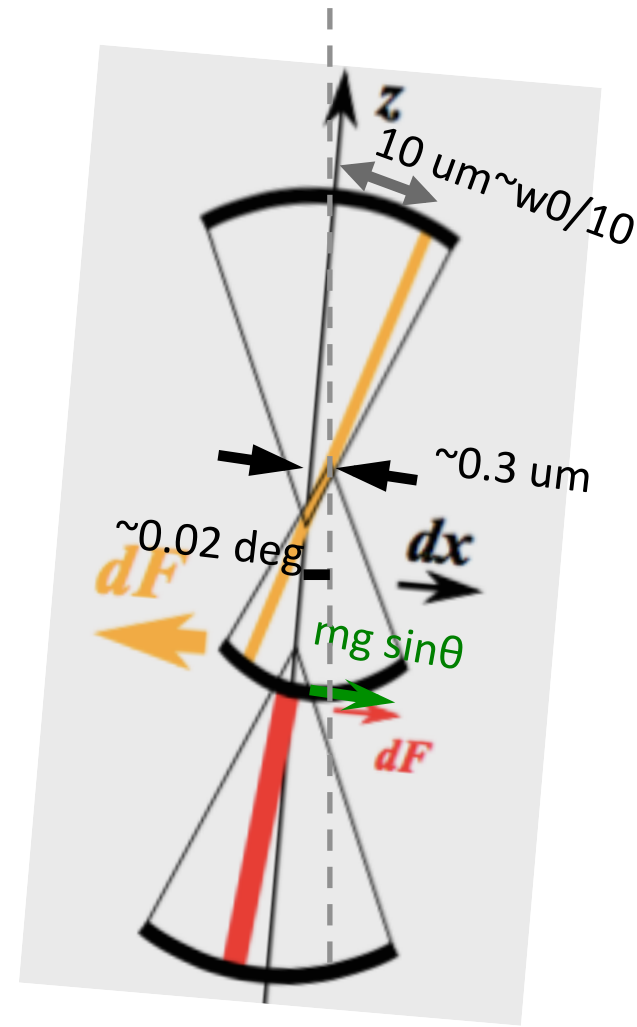
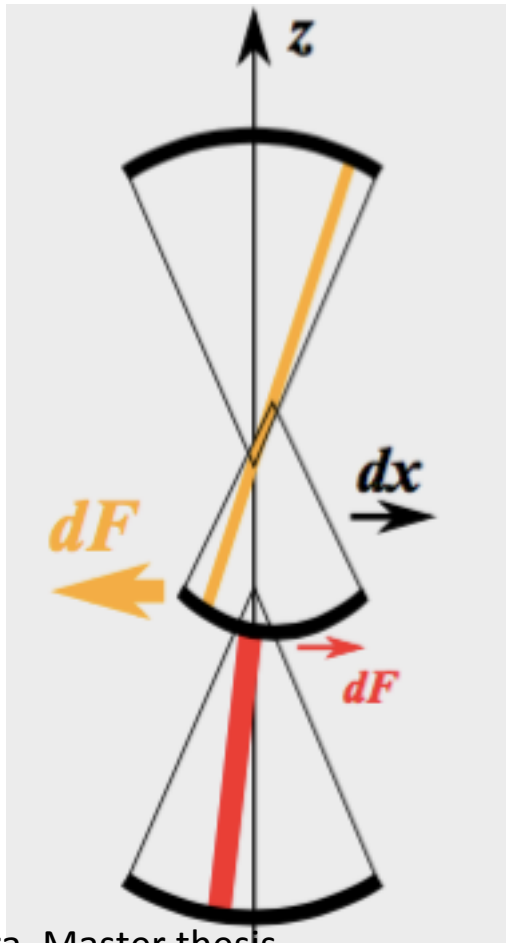


Sensitivity in Phase-1



Zenith angle misalignment effect

修正



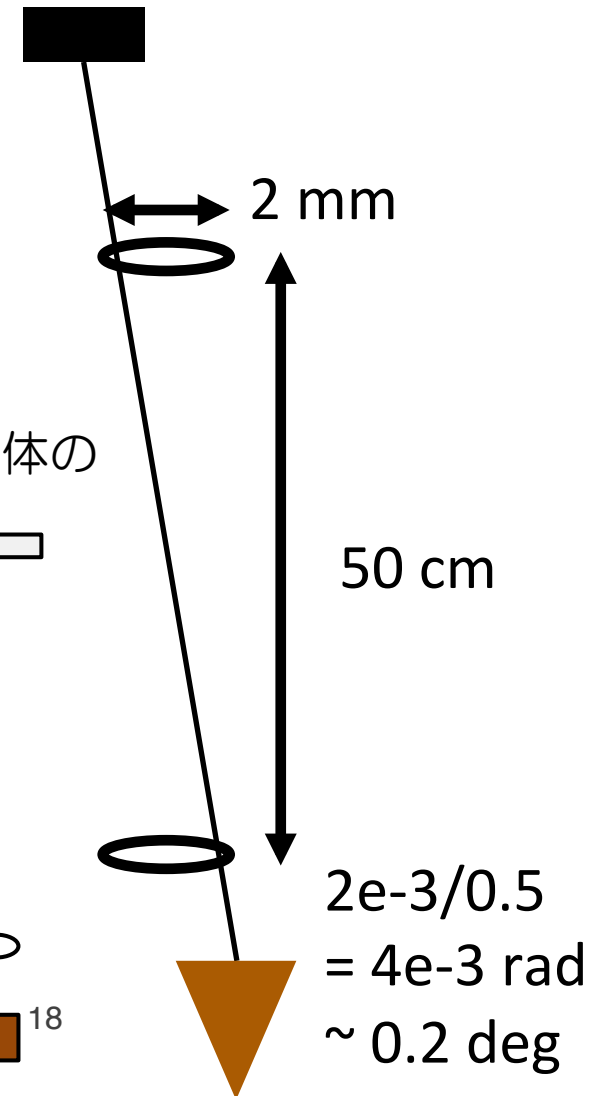
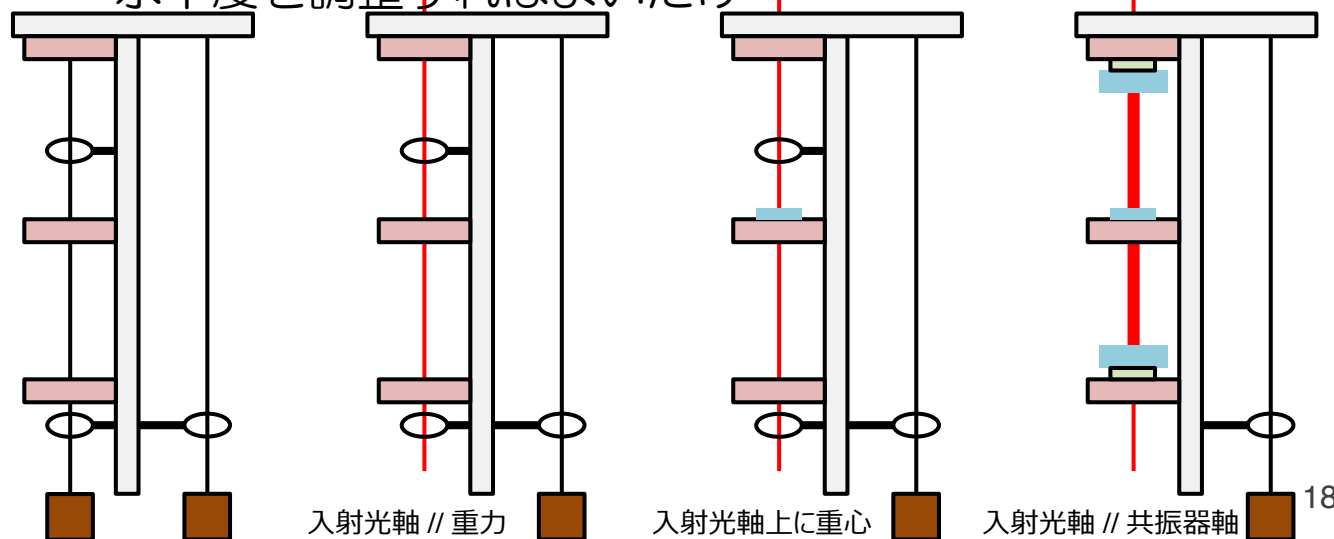
Y. Kuwahara, Master thesis
defense , University of
Tokyo (2016)

Zenith angle alignment

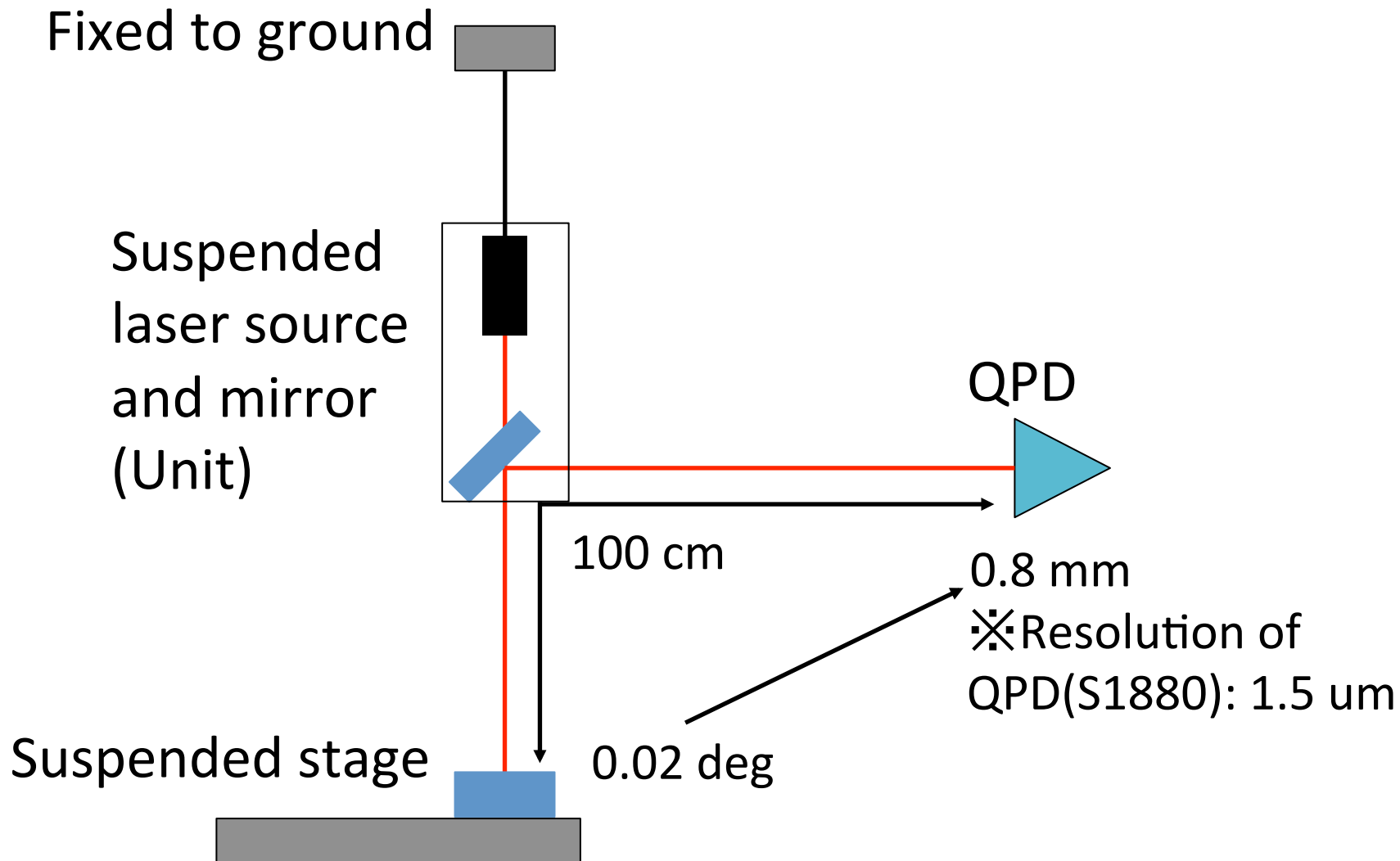
Y. Michimura, Seminar slide

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



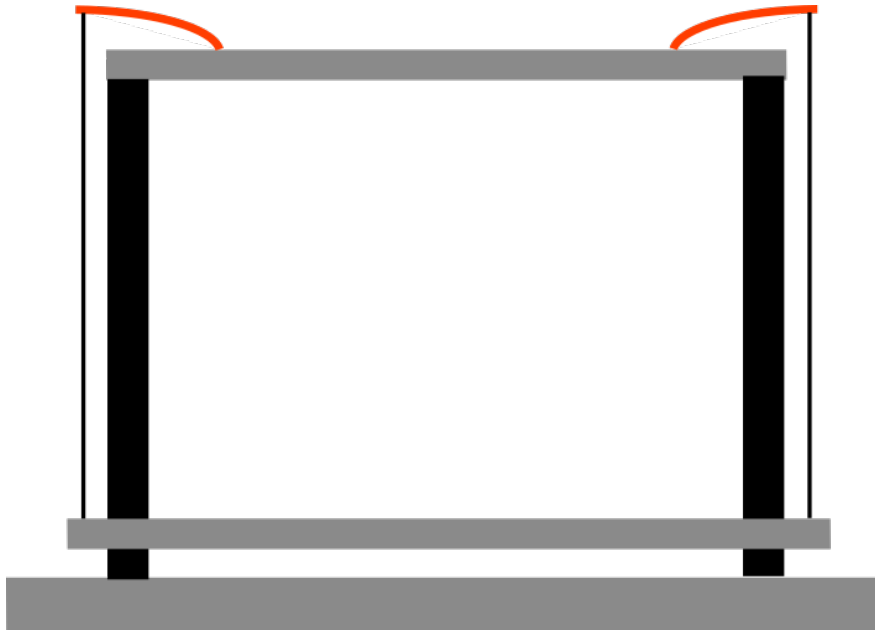
Zenith angle alignment



Blade spring or spring?

- Target resonant frequency is 1 Hz for horizontal and vertical.

- Blade spring



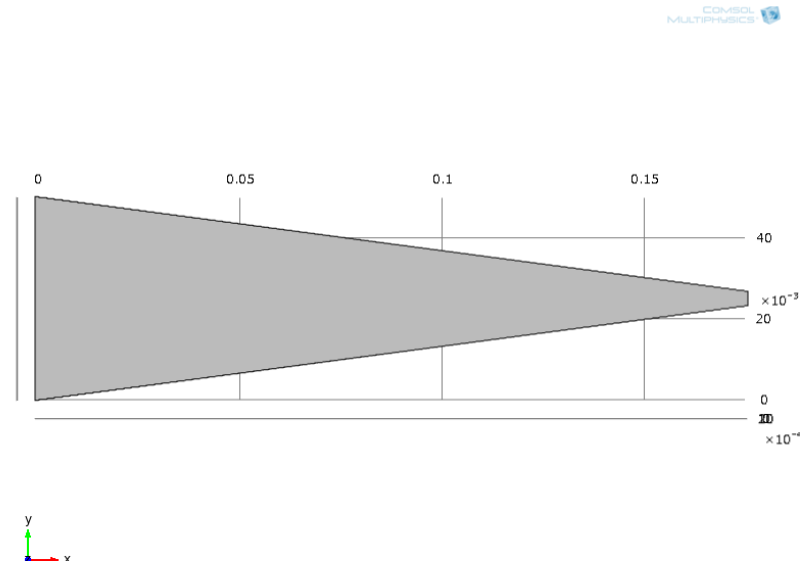
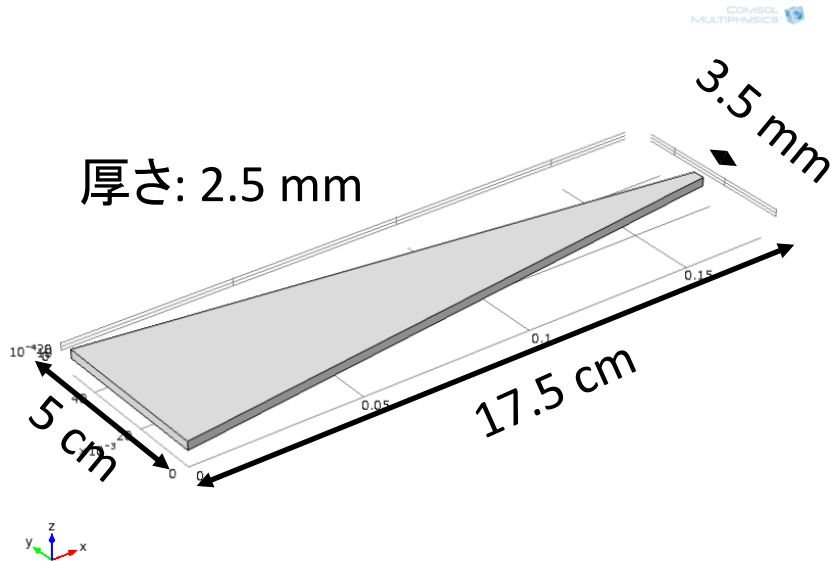
or

- Spring



Blade spring design

- Design of blade spring with COMSOL
 - 材質: ベリリウム銅
 - 厚さ: 2.5 mm, 長さ: 17.5 cm, 幅: 5 cm (根本), 3.5 mm (先端)
 - 一枚あたりの荷重: 5 kg (4本で20 kgを懸架)

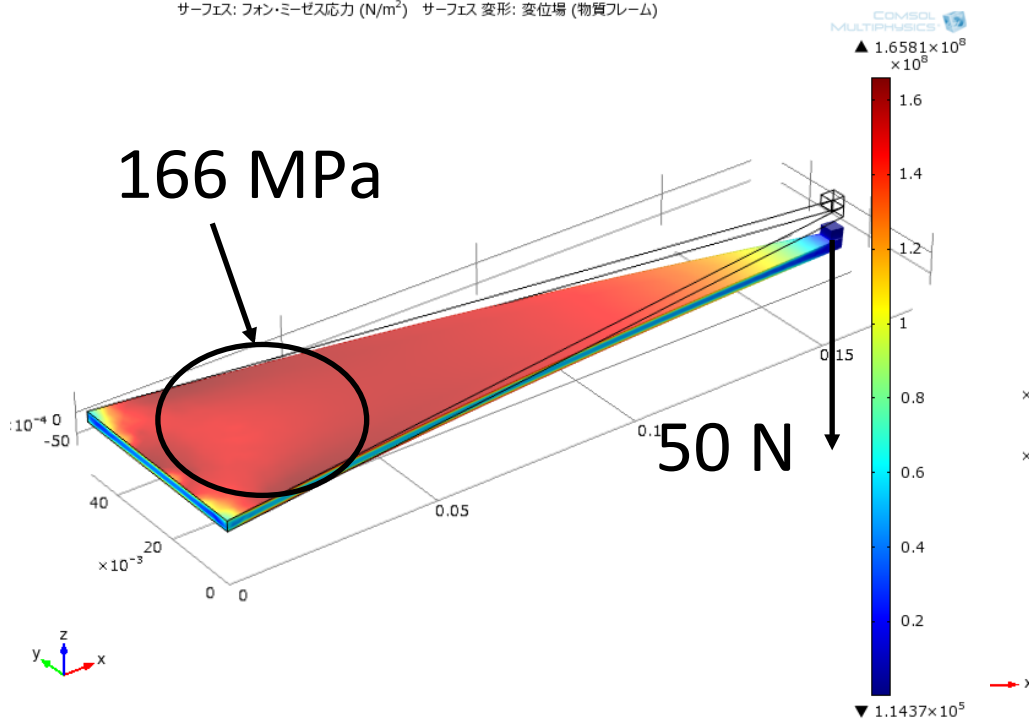


固定方法などの細かい点は川崎くんが設計中。

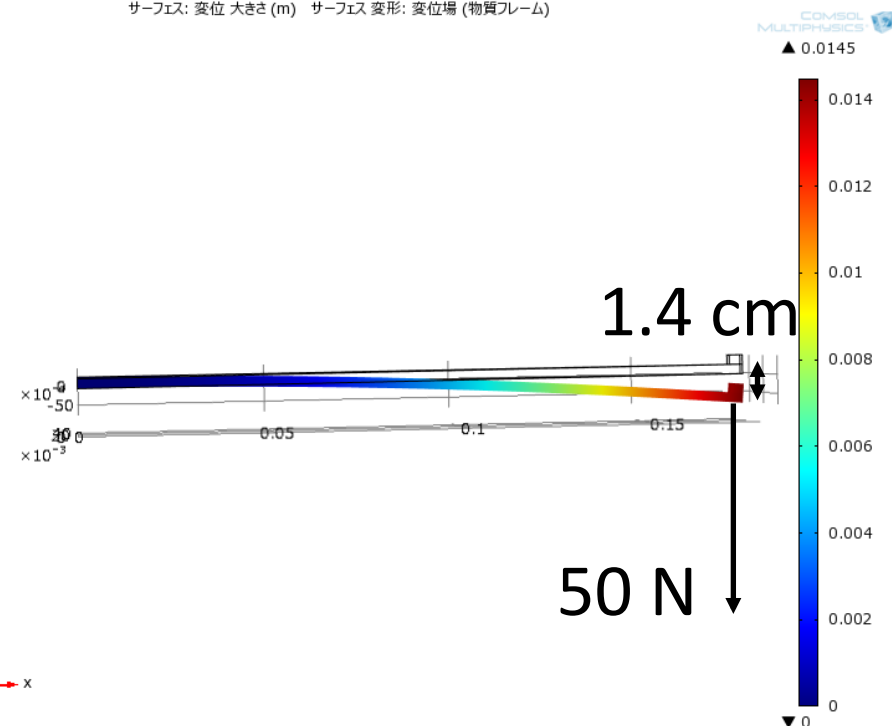
Blade spring design

- 5 kgを懸架したときの最大応力と変位量
 - 最大応力: 166 MPa, 変位量: 1.4 cm
 - (CuBeのバネ限界値>500 MPa)

サーフェス: フォン・ミーゼス応力 (N/m²) サーフェス 変形: 変位場 (物質フレーム)



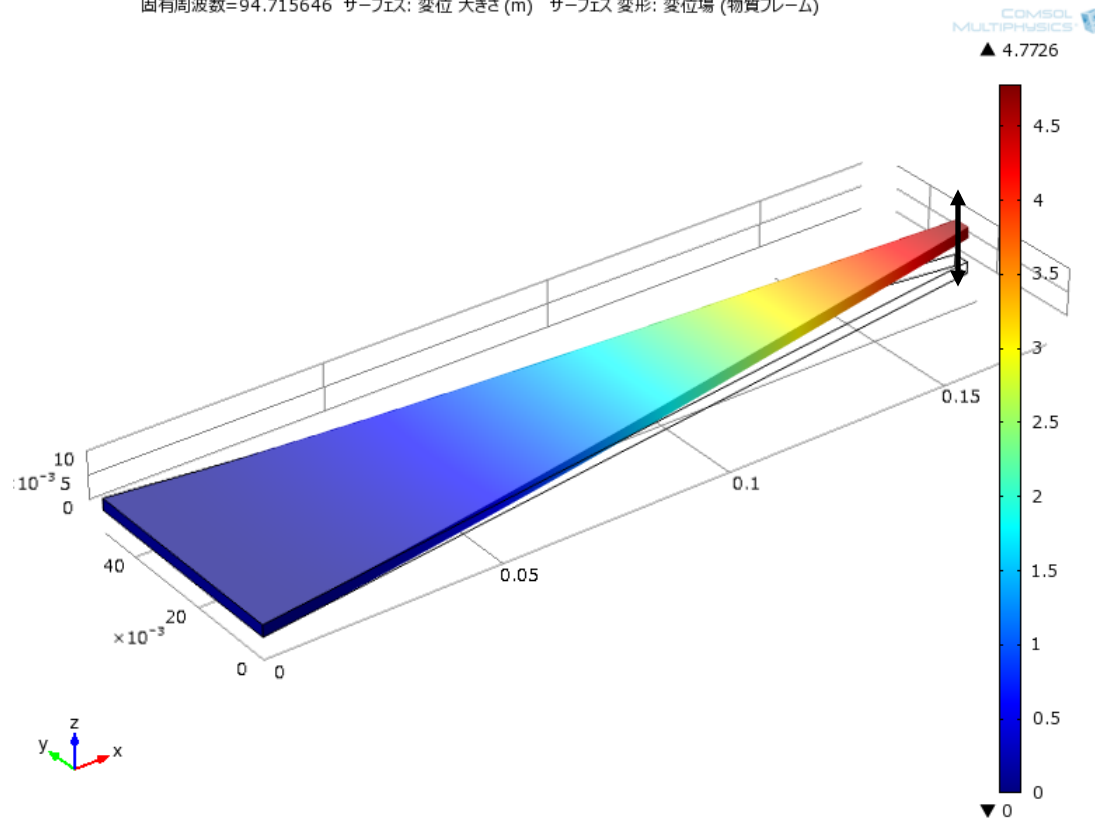
サーフェス: 変位 大きさ (m) サーフェス 変形: 変位場 (物質フレーム)



Blade spring design

- 5 kgを懸架したときの基本モード周波数変化
– 無荷重時: 95 Hz → 5 kg荷重時: 4 Hz

固有周波数=94.715646 サーフェス: 変位 大きさ (m) サーフェス 変形: 変位場 (物質フレーム)



Experimental configuration in Phase-2

- wave length: 1064 nm
- finesse: 100 (lower, upper)
- input power: 10 W (lower)
2.1 W (upper)
- lev. mirror mass: 0.2 mg
- int. reflectivity: 0.975 (lev.)
0.962 (l, u)
- freq. ref. : asymmetric FMI
- Passive stabilizing cavity (double pass)
 - length: 3 m (FSR: 100 MHz)
 - finesse: 3×10^4
 - cavity pole: 1.6 kHz
 - Intracavity power: ~ 300 kW!!

