

28aSK-1

重力波検出器KAGRAのための 量子雑音低減法の開発(1)

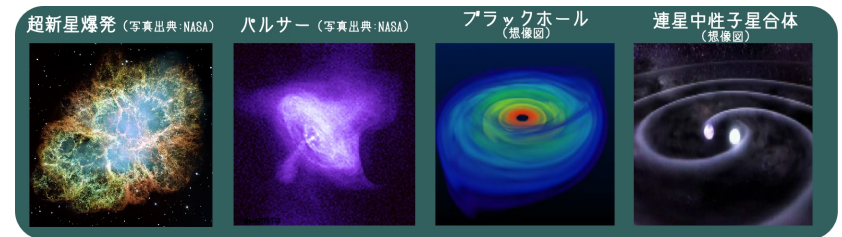
東大宇宙線研、東大工^A

長野晃士、榎本雄太郎、古澤明^A、川村静児



重力波とは

- 重力波とは、光速で伝わる時空のひずみの波である。
- 重力波の放射源
 - 天体現象
 - 初期宇宙(背景重力波)
- 重力波研究の目的 = 電磁波とは異なる手段での宇宙の観測(重力波天文学)
 - ブラックホールの生成メカニズムの解明
 - 強重力場下での一般相対論の検証
 - 初期宇宙の観測
 - etc.



大型低温重力波検出器KAGRA

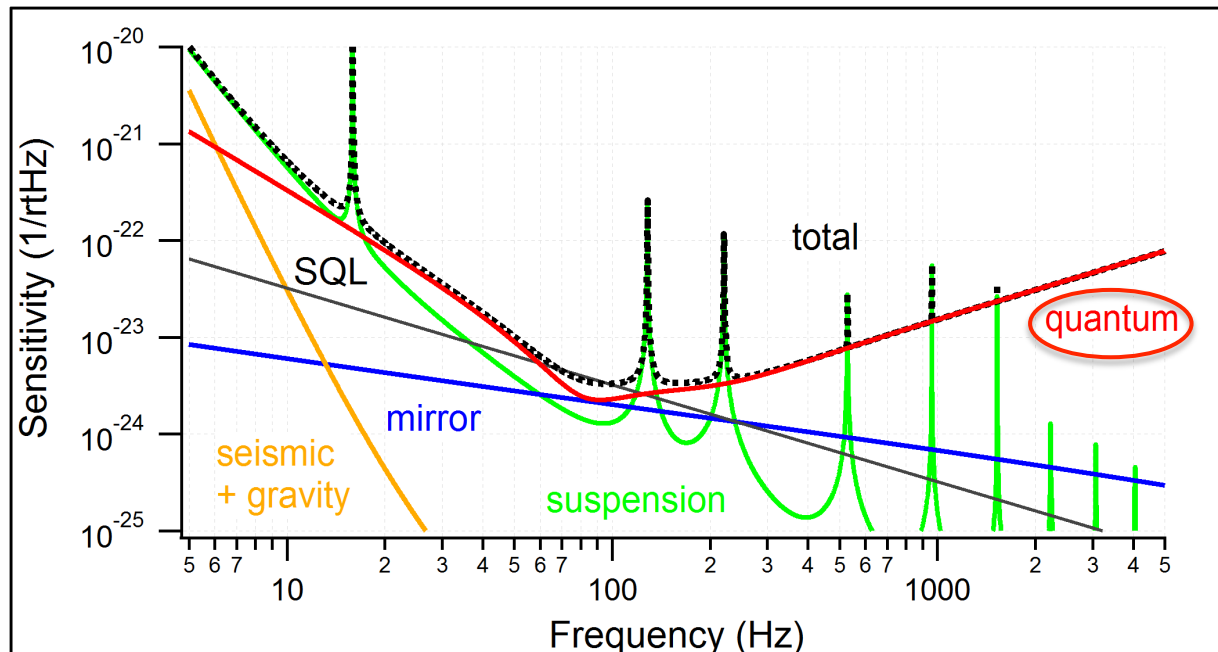
- 現在、岐阜県神岡の地下に建設中
- KAGRAの特長
 - 地下に建設 (=地面振動の低減)
 - 鏡を20 Kに冷却 (=鏡の熱雑音の低減)



KAGRAの感度

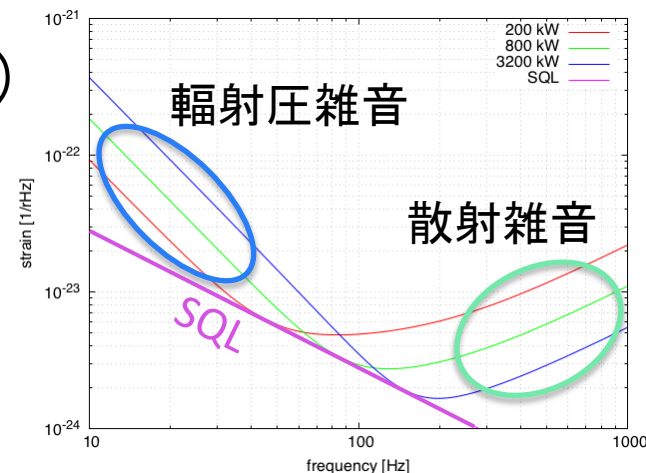
- KAGRAの最終的な感度は、広い帯域で量子雑音によって制限される。

→KAGRAの感度をさらに向上させ、重力波天文学を発展させるには、量子雑音の低減が必要である。



量子雑音

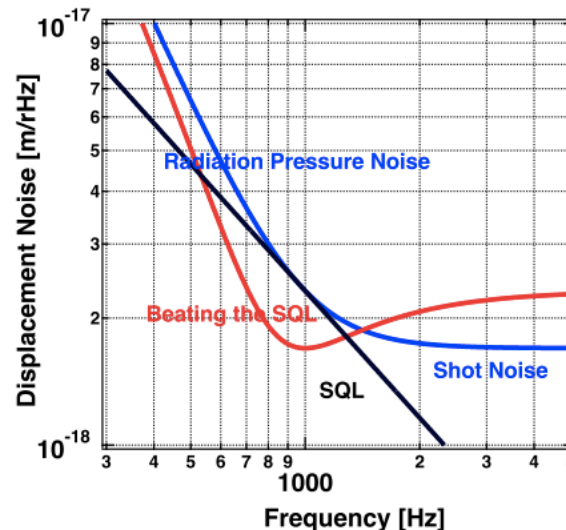
- 量子雑音（散射雑音＋輻射圧雑音）の低減方法
（×レーザーパワーを変化させる。
→標準量子限界という限界がある。）
 - 標準量子限界を超える方法
 - ダークポートからスクイズド光を入射させ、フィルターキャビティを使用する。
 - 光バネを用いる。
 - ポンデロモータィブスクイーミングされた場をホモダイン検波により観測する。
- 散射雑音の低減技術は既に実証されている。
- 輻射圧雑音の低減はまだ実証されていない。
 - そのための輻射圧雑音にリミットされた測定も、まだ一部の帯域でしか実現されていない。



実験の目的

- 最終目標

- ポンデロモーティブスキューニングを利用したホモダイン検波による輻射圧雑音の低減技術の実証



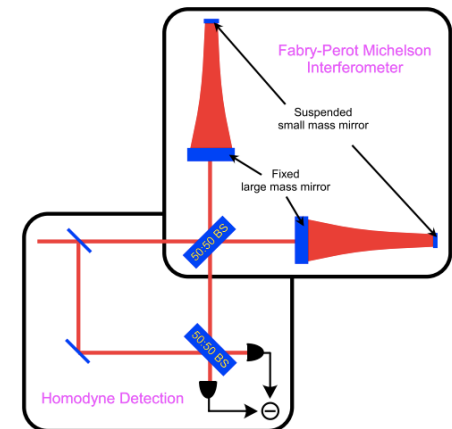
阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

- 中期的目標

- 広い周波数帯域で輻射圧雑音に制限された測定
の達成

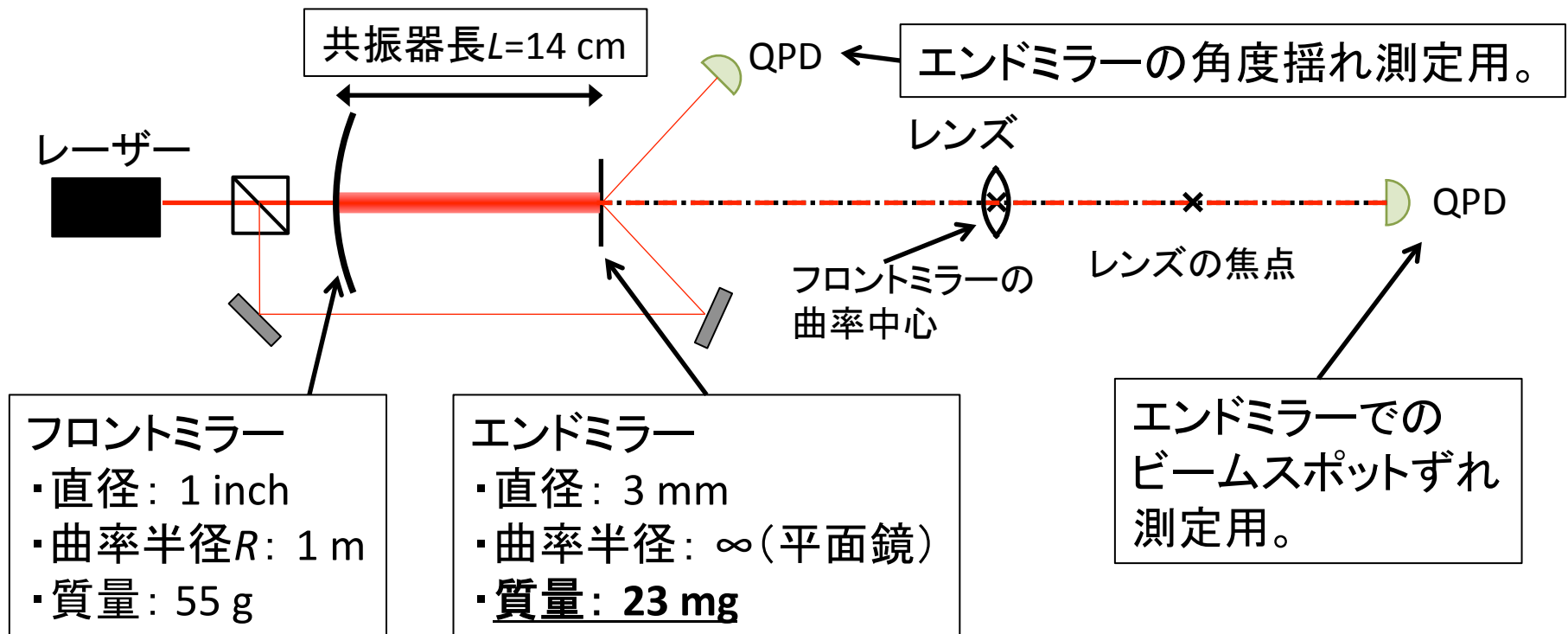
中期的目標

- 広い周波数帯域で輻射圧雑音に制限された測定をするために、
 - 高フィネスのFabry-Perot共振器を組み、共振器内パワーを上げ、輻射圧雑音をエンハンスする。
 - さらに、共振器の片方の鏡を軽量鏡にすることで輻射圧雑音を際立たせる。
 - FPMIを組むことで同相雑音（古典強度雑音など）を低減することで、輻射圧雑音レベルまで感度を向上させる。



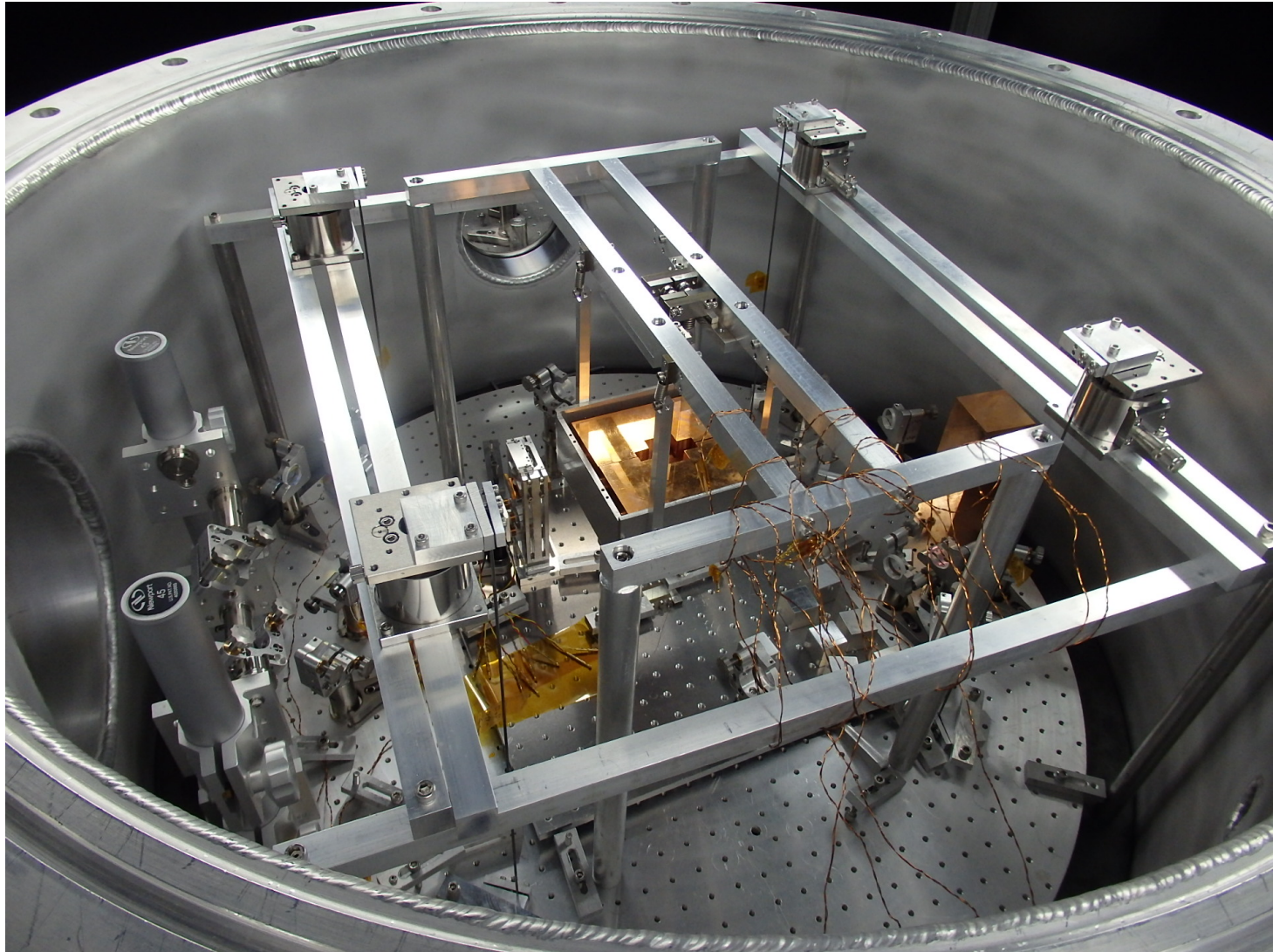
阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

実験装置の概要



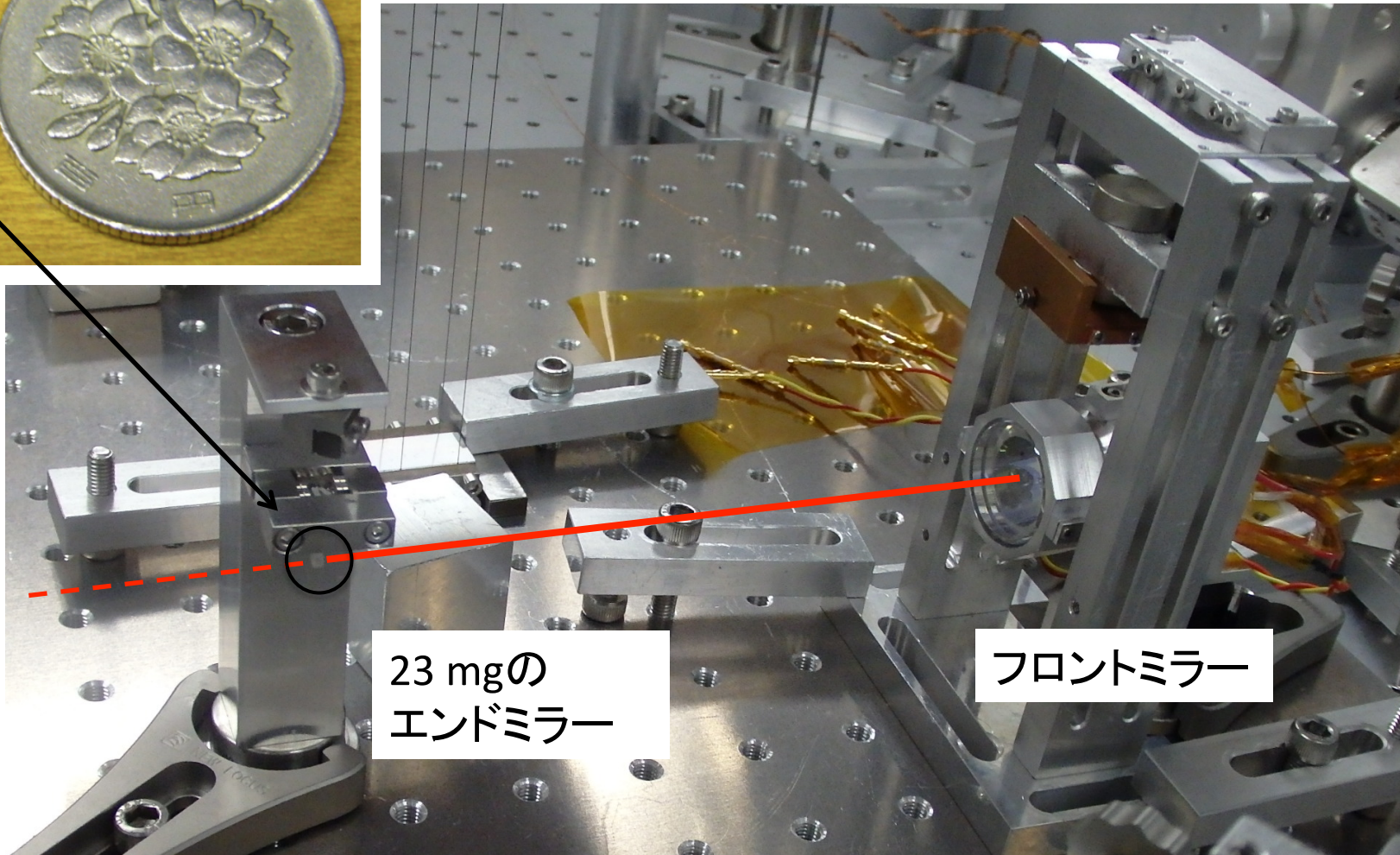
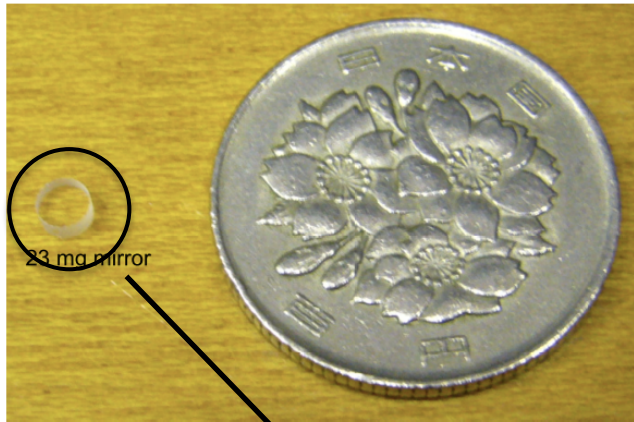
- ・ 高フィネスかつ軽量な鏡で構成された共振器を安定に制御できることを確かめるために、低フィネス(~ 400)だが軽量な鏡で構成された共振器を用いた実験を行っている。
- ・ 防振装置の改良により、長時間(3時間以上)共振状態を保っている。

実験装置の概要



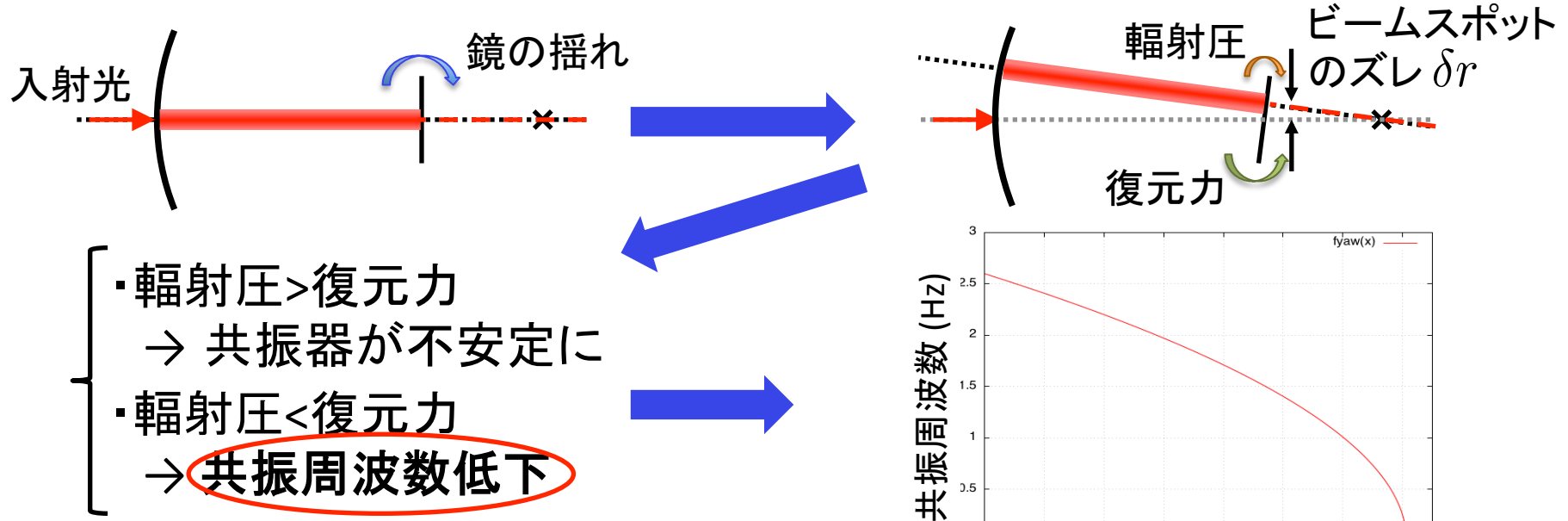
実験装置の概要

阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。



現在の課題

- 共振器内パワーが大きくなると、鏡の回転方向の光反バネ効果 (Sidles-Sigg効果)による不安定性が大きくなり、共振器内パワーを上げることができない。
 - 共振器内パワーが上昇すると、回転方向の実効的なバネ定数が低下し、共振周波数が低下する。

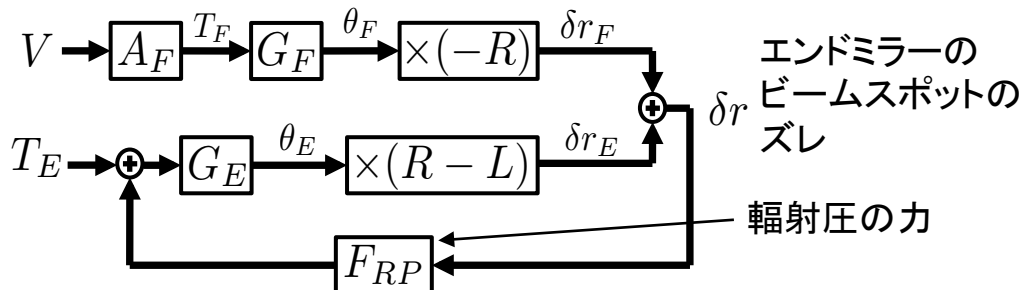


現在の課題

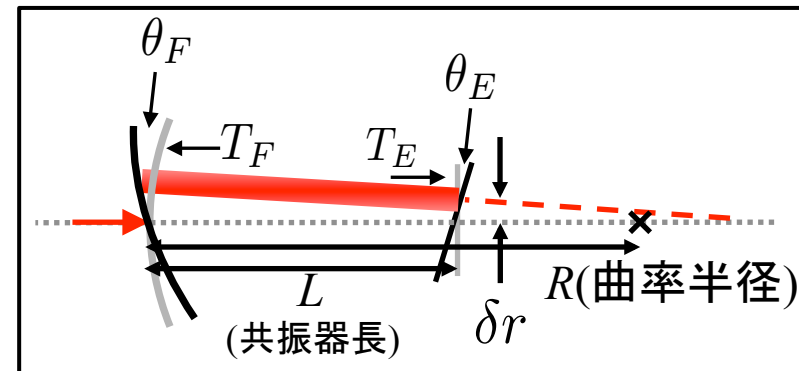
- 共振周波数のパワー依存性を精密に測定したい。
- 共振周波数を測定するためには、 $T_E \rightarrow \theta_E$ の伝達関数を測定すれば良い。

$$\frac{\theta_E}{T_E} = \frac{G_E}{1 - F_{RP} G_E (R - L)}$$

- ただし、いまはエンドミラーが小さいため回転運動を直接励起することが難しい。
- そのため、以下の方法が考えられる。
 - スペクトルを測定する。
 - (別の)伝達関数を測定する。



Yaw回転方向のブロックダイアグラム



ダイアグラム中の各文字の意味

スペクトルの測定と伝達関数の測定

- 光テコを用いた θ_E のスペクトルの測定

- この方法の利点

- θ_E を直接測定することができる。

[1] S. Sakata et al. Phys. Rev. D
81, 064023 (2010)

- この方法の問題点

- T_E のスペクトルが未知であり、それがホワイトでない場合は実際に測定したい $T_E \rightarrow \theta_E$ の伝達関数と異なる測定になる。
 - 光テコを用いるため、様々な外乱の影響が大きい。

- 伝達関数の測定

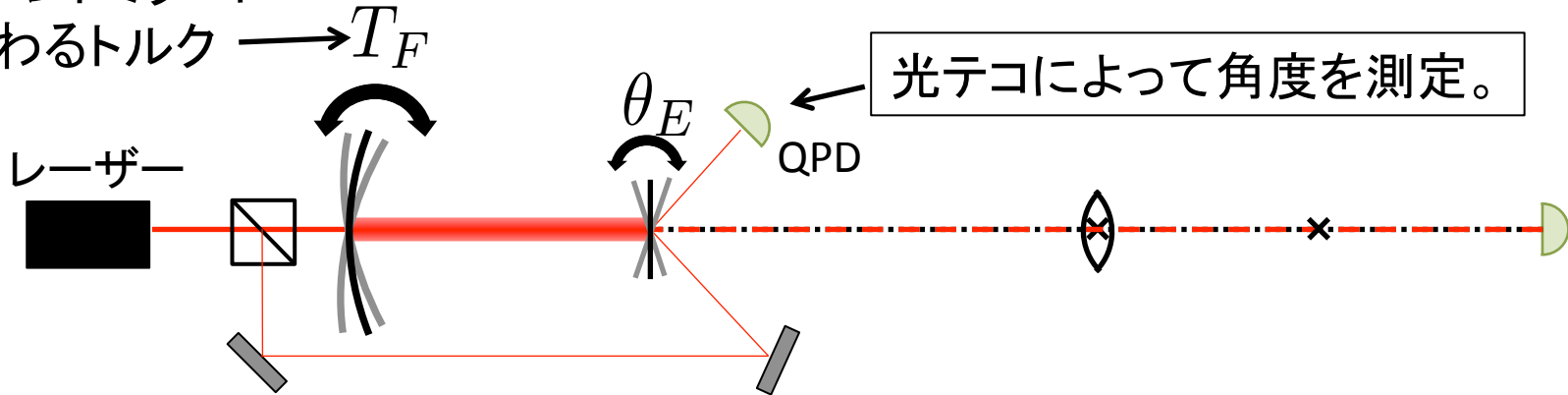
- この方法の利点

- 伝達関数にはエンドミラーとフロントミラーの回転方向の共振によるピークのみが現れると予想される。
 - 十分大きな電圧を入力することで外乱の影響を受けにくい測定をすることができる。

伝達関数の測定

① $T_F \rightarrow \theta_E$ の伝達関数 [2] 小仁所志栞 東京大学 修士論文 (2015)

フロントミラーに
加わるトルク $\rightarrow T_F$

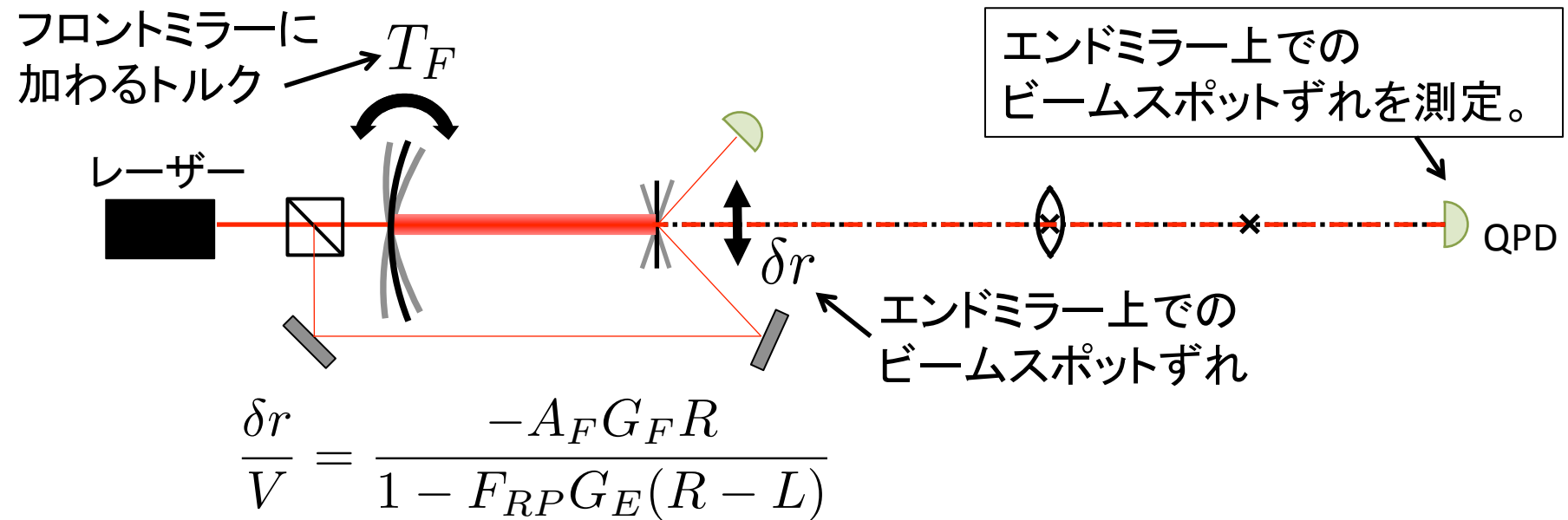


$$\frac{\theta_E}{V} = \frac{-A_F G_F R F_{RP} G_E}{1 - F_{RP} G_E (R - L)}$$

- $T_F \rightarrow \theta_E$ の伝達関数は共振器パワーが小さい場合は測定することができない。また、光テコを用いるため測定の雑音が大きい。

伝達関数の測定

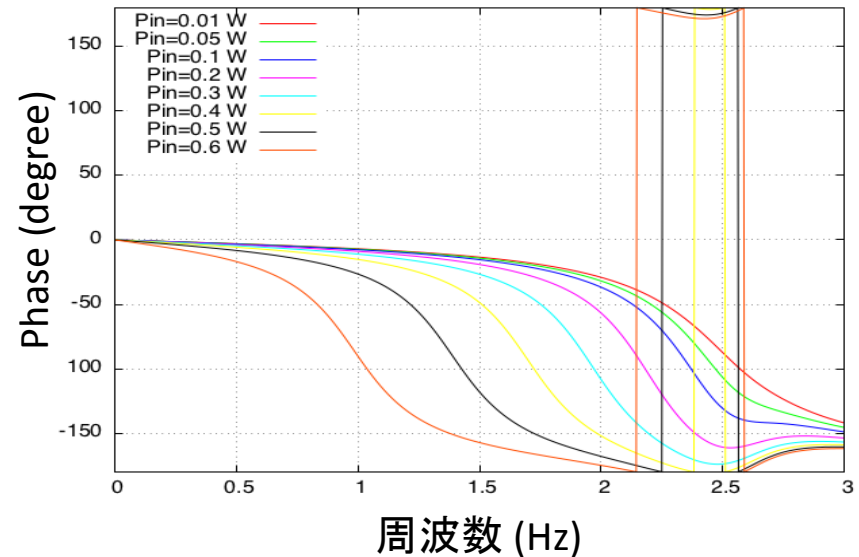
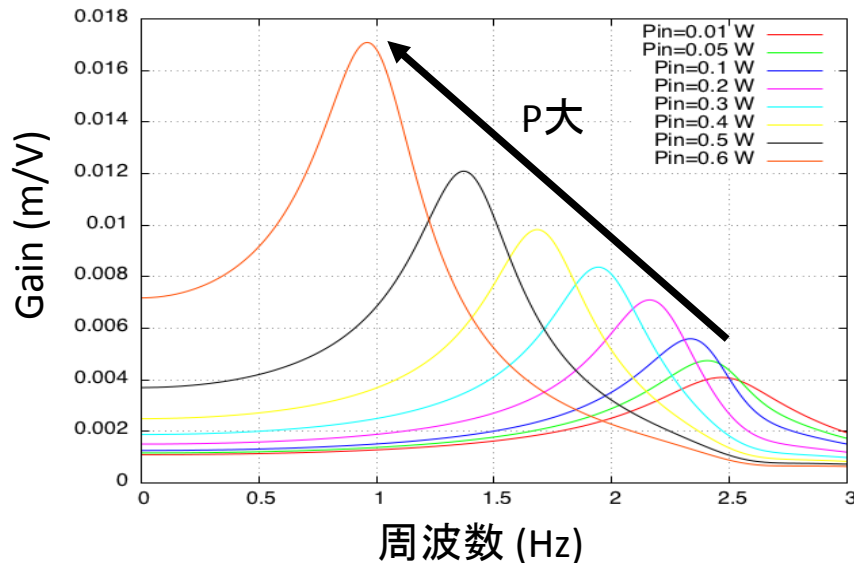
② $T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数 ← 今回考案した新しい方法



- $T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数は低パワーでも測定することができる。また、光テコを用いずに δr を直接測定できるので雑音が小さいという利点もある。
- これらの方法は、いずれも、輻射圧によって直接接触することなくエンドミラーを励起している。

$T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数の測定

• $T_F(V) \rightarrow \delta r$ の伝達関数のシミュレーション



- 共振器内パワーが大きくなるにつれて、伝達関数のピーク周波数が低くなっている。
 - これは次のスライドで説明するように、輻射圧によるエンドミラーの実効的なバネ定数の低下を反映している。

$T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数の測定

- シミュレーション結果の解釈

- いま簡単のため、鏡が一段で懸架されていて、

$$G_E \propto \frac{1}{s^2 + \omega_E^2}, \quad G_F \propto \frac{1}{s^2 + \omega_F^2}$$

であるとする。

- 測定したいものは、

$$\frac{\theta_E}{T_E} = \frac{G_E}{1 - F_{RP}(R - L)G_E} \propto \frac{1}{s^2 + [\omega_E^2 - F_{RP}(R - L)]}$$

である。

- 測定するものは、

$$\frac{\delta r}{T_F} = \frac{-G_F R}{1 - F_{RP}(R - L)G_E} \propto \frac{s^2 + \omega_E^2}{(s^2 + \omega_F^2)\{s^2 + [\omega_E^2 - F_{RP}(R - L)]\}}$$

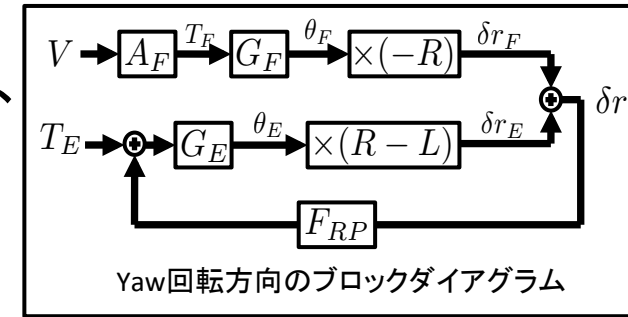
である。

- もし、 $\omega_E = \omega_F$ なら、これら2つ伝達関数は同じものになる。

- 実際、 $\omega_E/2\pi = 2.6 \text{ Hz}$ 、 $\omega_F/2\pi = 2.5 \text{ Hz}$ でほぼ同じ。

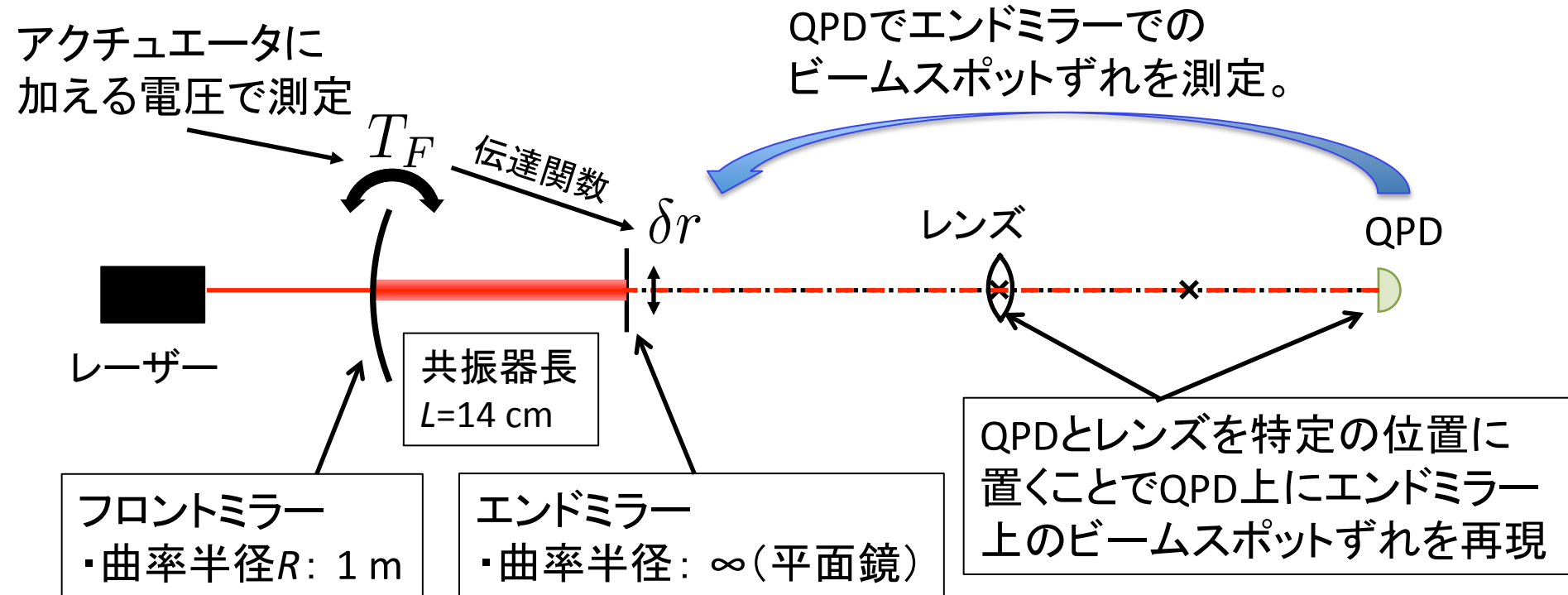
- また、もっとも重要なピークの位置は $\omega_E^2 - F_{RP}(R - L)$ だけで決まる。

→ $T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数を測定することで、エンドミラーの回転方向の共振周波数の低下を測定することができる。



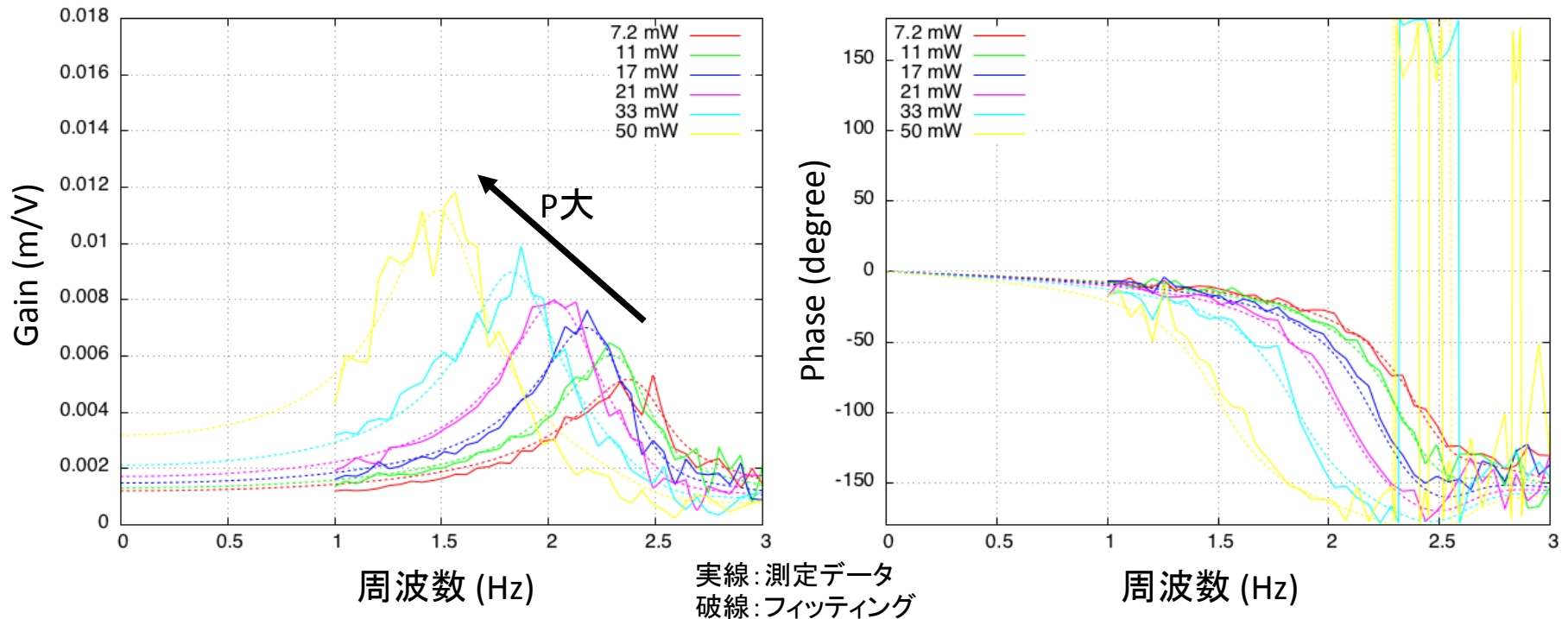
同じ項がある

実験装置の概要



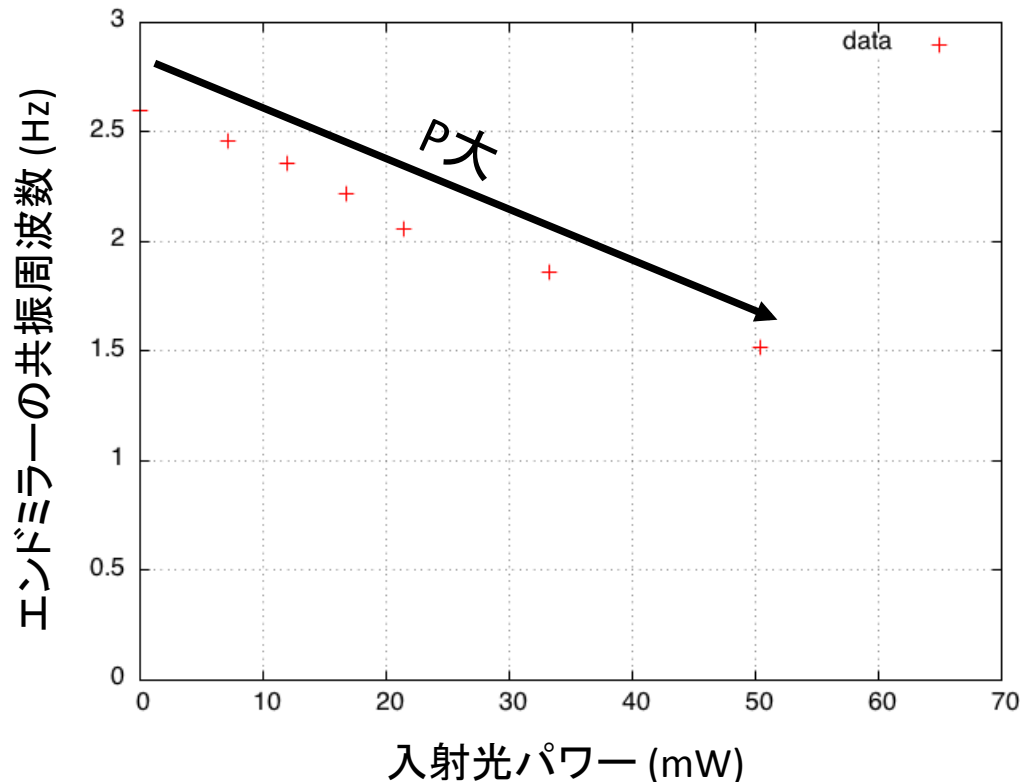
- $T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数を測定することで、エンドミラーの回転方向の共振周波数の低下を測定することができる。

$T_F \rightarrow \delta r$ の伝達関数の測定



- 入射パワーを大きくするにつれて、ピーク周波数が低周波にシフトしている事がわかる。
- 位相も測定できている。

共振周波数の変化



- 測定対象に直接触れることなく、輻射圧で遠隔的に励起するという初めての方法で、輻射圧の効果による共振周波数の低下を精度よく測定することができた。

まとめと今後の展望

- ポンデロモーティブスキージングされた場をホモダイン検波で観測することによる輻射圧雑音の低減技術の実証を目指している。
- そのために、輻射圧雑音によって制限された観測を行う必要がある。
- 輻射圧雑音を際立たせるために、高フィネスかつ軽量鏡を持つ共振器を用いた干渉計を組む予定である。
- 輻射圧によって遠隔励起するという初めての方法で、輻射圧の効果による共振周波数の低下を精度よく測定することができた。
- Sidles-Sigg効果による不安定性を除去する。
 - 詳細はこの後の榎本くんのトークで。

予備

量子雑音

- 量子雑音 = 散射雑音 + 輻射圧雑音

- 原因: 光の量子性

- 散射雑音

- 光の位相雑音
 - $\text{SNR} \propto 1/\sqrt{P}$

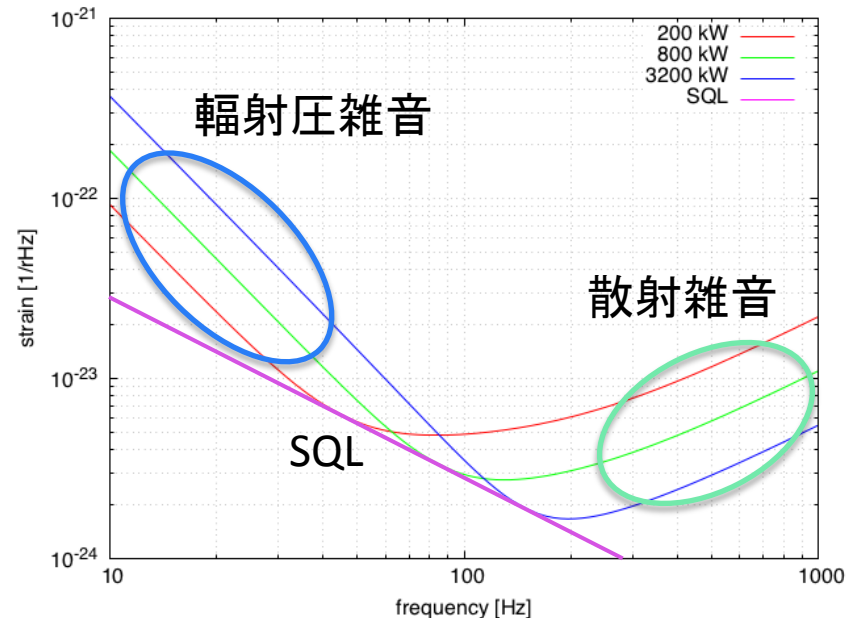
- 輻射圧雑音

- 光の強度雑音
 - $\text{SNR} \propto \sqrt{P}$

- 標準量子限界

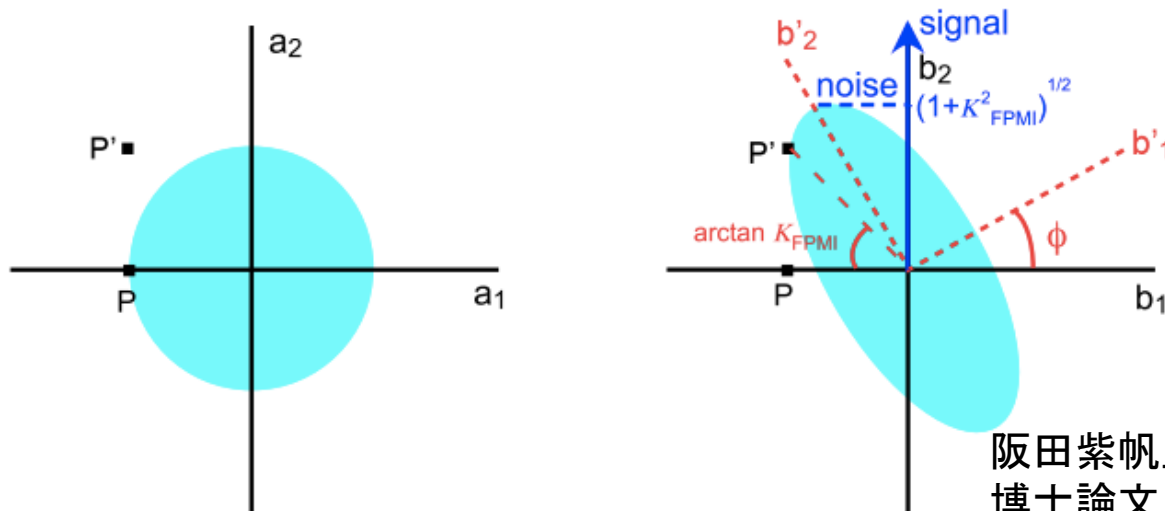
- 量子雑音には、レーザーパワーを変化させるなどの通常の方法ではそれ以上雑音を低減できない限界が存在する = 標準量子限界 (SQL)

→ SQLを突破するためには新しい測定を行う必要がある。



輻射圧雑音の低減

- ポンデロモーティブスキュージング
 - 干渉計のダークポートから入射した真空場揺らぎの強度ゆらぎと位相揺らぎが、鏡の位置変化を介して相関を持つようになりスキューズされること



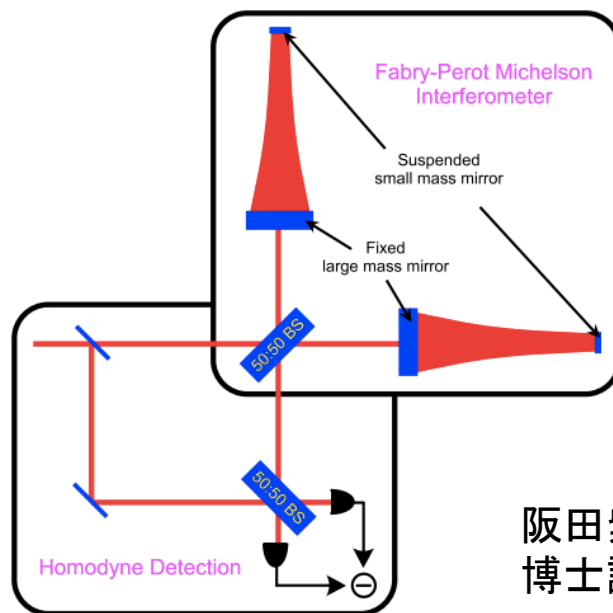
阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

(左図) ダークポートに入射した真空場揺らぎ。
(右図) 干渉計に入り、再びダークポートから戻ってきた
ポンデロモーティブスキュージングされた真空場揺らぎ。

輻射圧雑音の低減

- ホモダイン検波

- ビームスプリッターの両側から干渉後の光と局部発振波を入射し、2つのフォトダイオードによって検出してその差動信号を測定するもの。



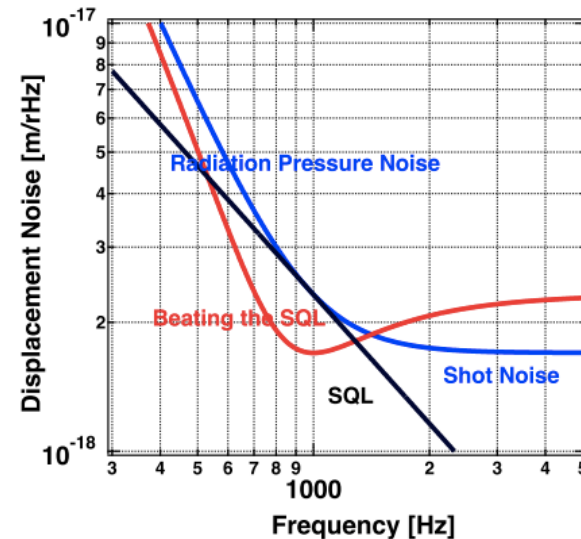
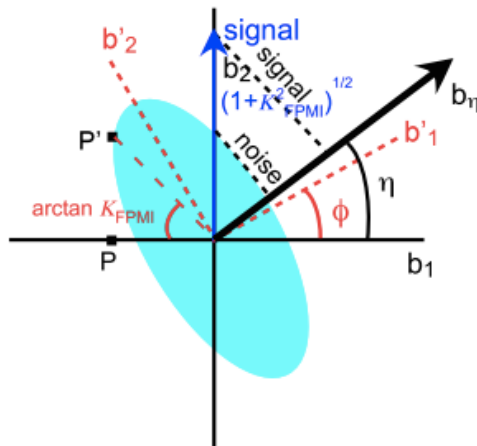
阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

輻射圧雑音の低減

- ホモダイン検波(続き)

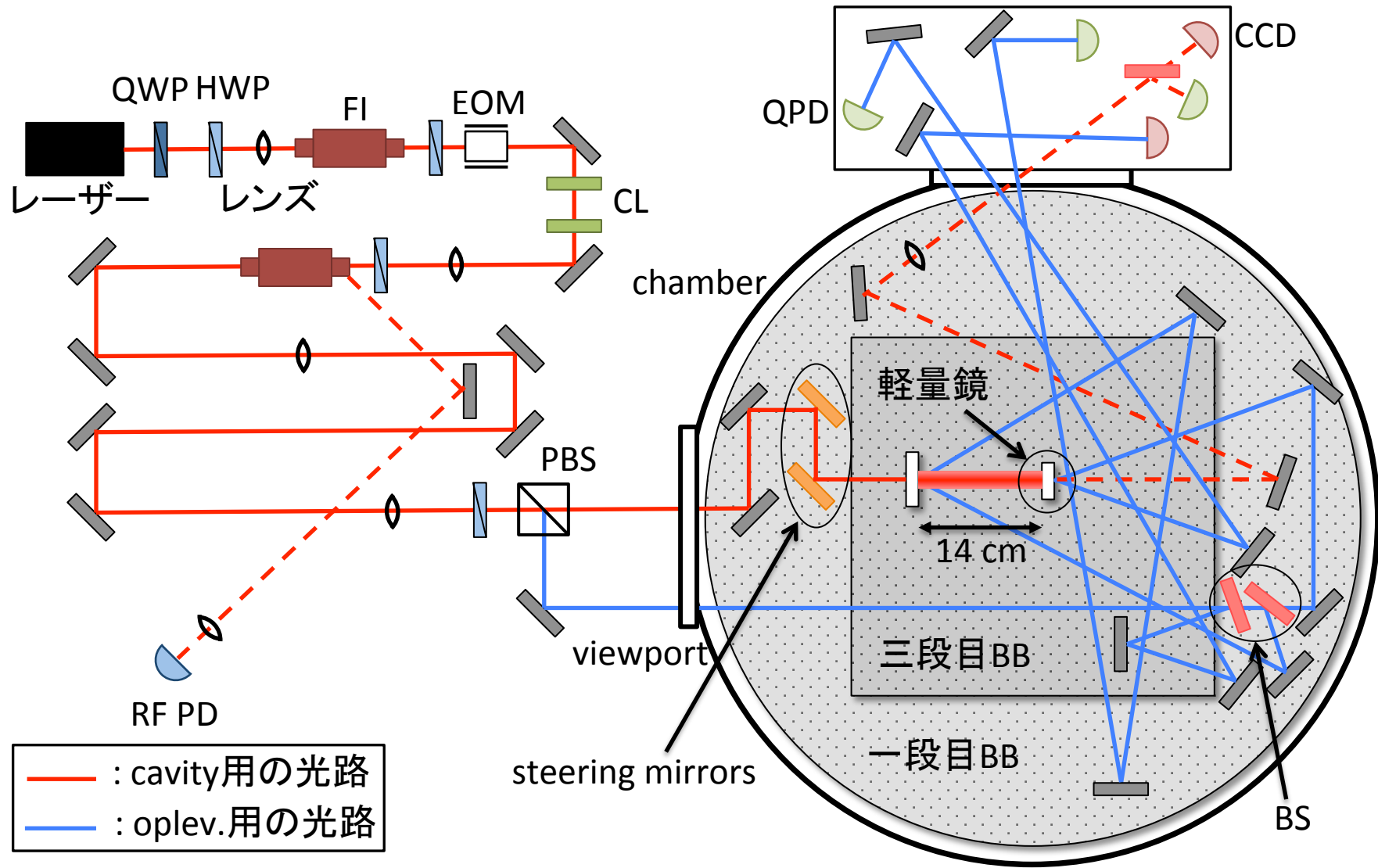
- 信号を取得する位相を選択できるようになる。

- スクイーズされた場に対して、最適な位相を選択することでSN比を大きくすることができる。



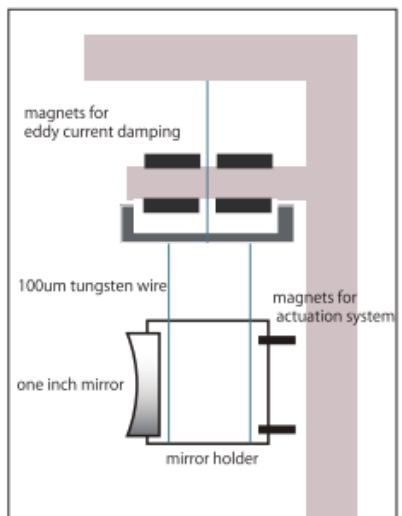
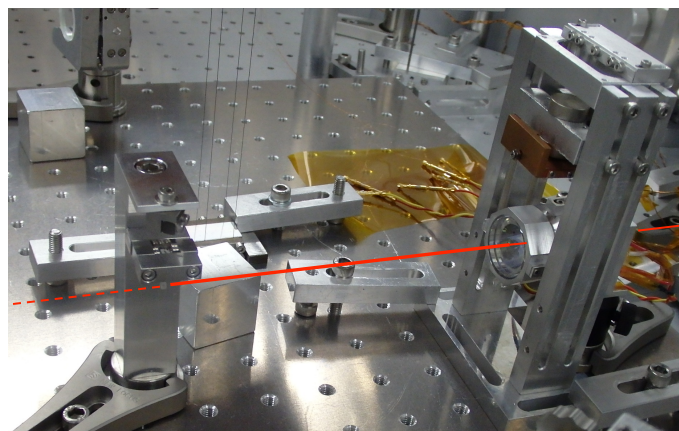
阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

実験装置の概要

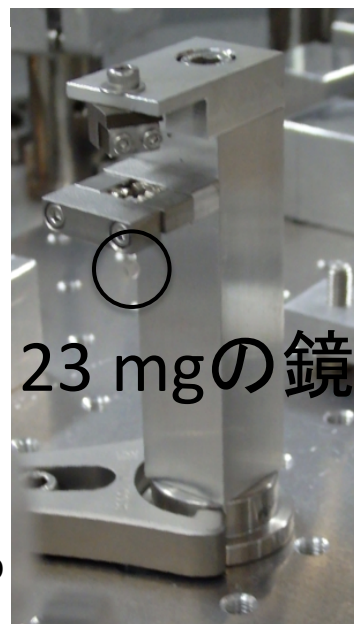


共振器の概要

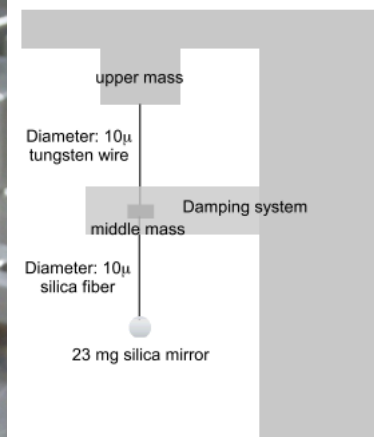
- 共振器の特性
 - フロントミラー (coil-magnet actuator付き)
 - 直径: 1 inch、曲率: 1 m、透過率: $<0.2\%$
 - エンドミラー
 - 直径: 3 mm、平面鏡、透過率: 測定予定、質量: 23 mg
 - 共振器長: 14 cm
 - フィネス: ~ 400



T. Mori Univ. of Tokyo
Thesis (2011) より。



23 mgの鏡



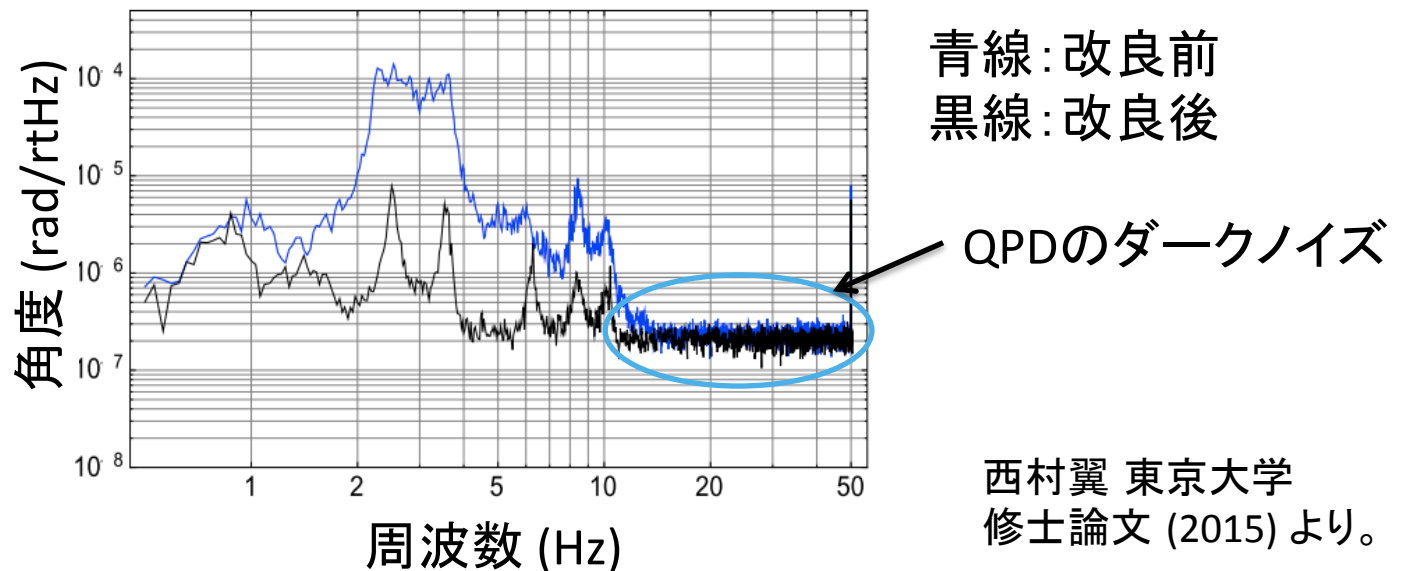
阪田紫帆里 お茶の水
女子大学博士論文
(2008) より。

防振系の改良

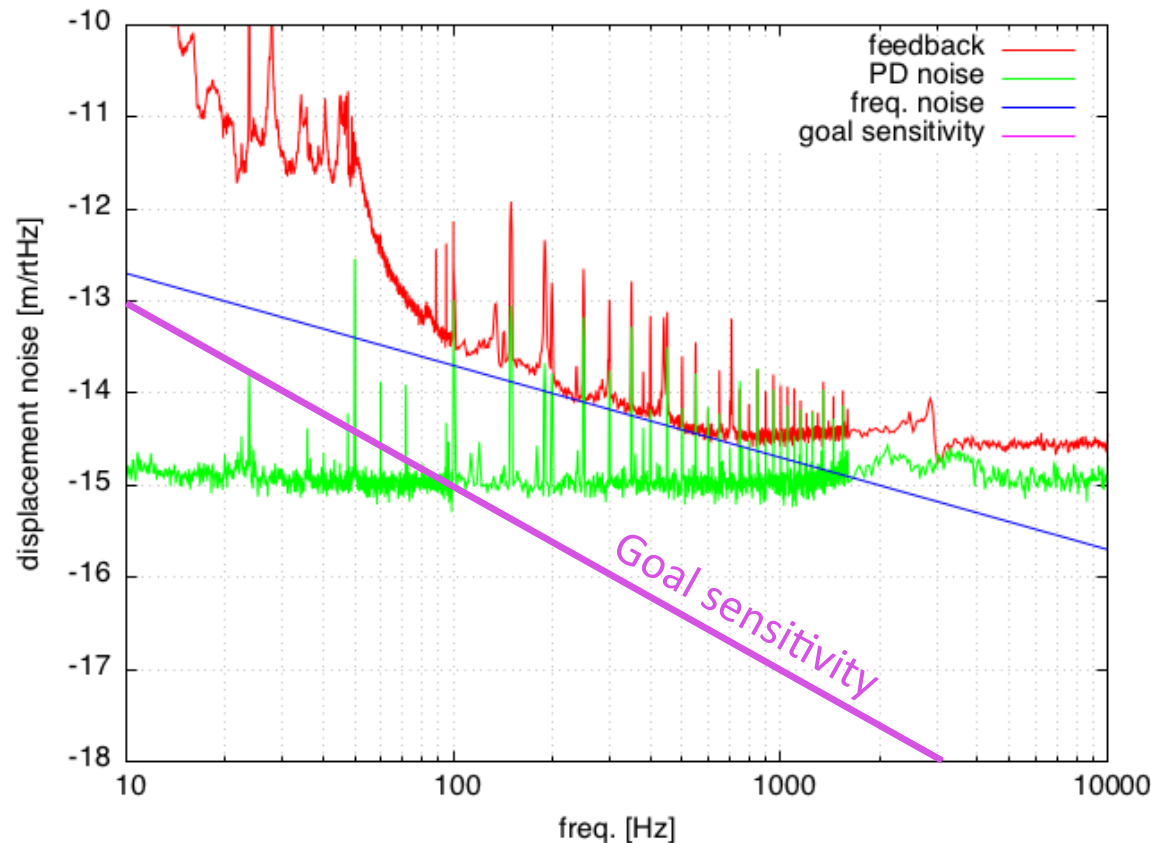
- 国立天文台から宇宙線研究所に実験室が移動したことにより地面振動が増大し、軽量鏡の揺れが大きくなり、共振器を安定に共振状態に保つことが難しくなっていたが、防振系の改良により、天文台で実験を行っていた時と同様の測定ができるようになっている。

防振系の改良

- スタック+二段振り子 → 三段振り子
(共振器の鏡はさらに二段で懸架されているので、計五段で懸架されている。)
- この改良により軽量鏡の回転方向の揺れが低下。
 - 1.5 Hzより高周波の帯域では揺れが小さくなっている。

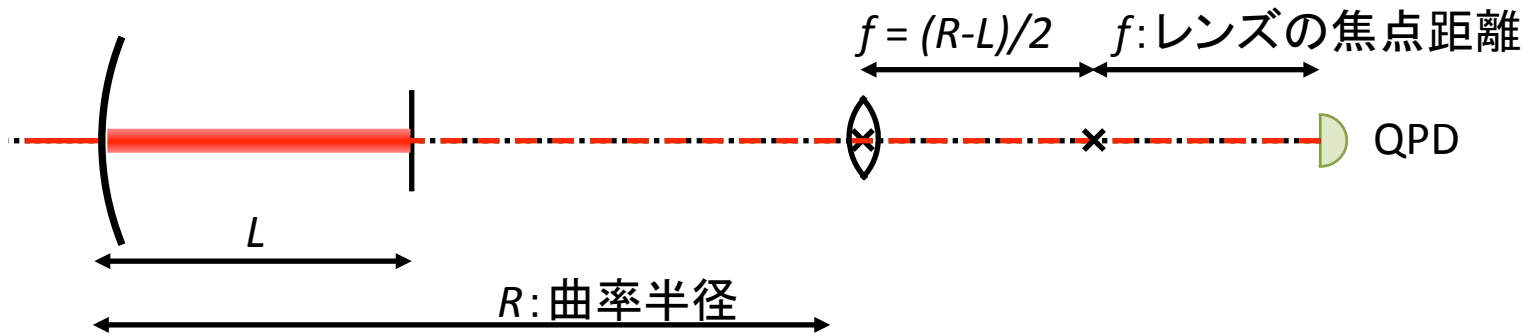


現在の感度

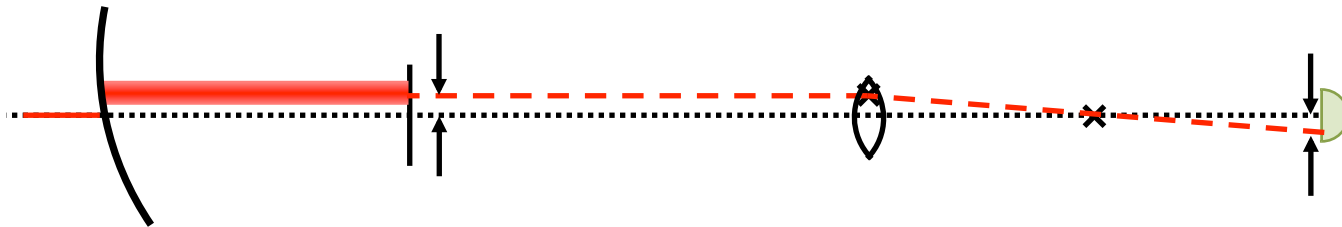


- 輻射圧雑音まであと1-2桁。
 - 100 - 1000 Hzはレーザーの周波数雑音、1000 Hzより高い帯域はPDのダークノイズに制限されている。

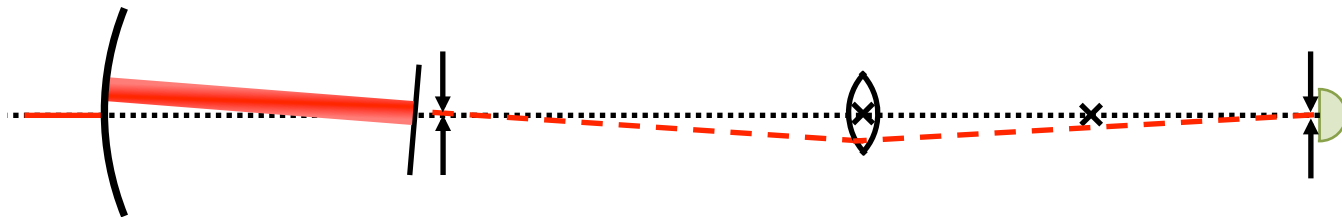
ビームスポットズレの測定方法



・エンドミラー上のビームスポットがずれた場合



・エンドミラー上のビームスポットがずれない場合



エンドミラー上のビームスポットのズレのみをQPDで測定できる

輻射圧雑音測定のための要求値

- 入射レーザーパワー: 120 mW
- フィネス: 10^4
- エンドミラー
 - 反射率: 99.999%、質量: 23 mg、直径: 3 mm、厚さ: 1.5 mm、機械的Q値: 10^5
- フロントミラー
 - 反射率: 99.94%、ロス: 30 ppm、質量: 14 g
- コーティングのロスアングル: 4×10^{-4}
- エンドミラーでのビームサイズ: 342 μm
- 温度: 300 K
- 圧力: 0.1 Pa