

重力波検出器KAGRAのための 量子雑音低減法の開発

東京大学 理学系研究科物理学専攻
長野 晃士



概要

- 現在日本では、レーザー干渉計型重力波検出器KAGRAの建設が進んでいる。
- 本研究では、KAGRAで用いられる量子雑音 (輻射圧雑音) 低減技術の原理実証のための実験を行っている。本研究の特長は、23 mgの軽量懸架鏡を持つ高フィネスのFabry-Perot共振器を用いて輻射圧雑音を増幅することである。
- 現在は、アクチュエーターを持たない23 mgの軽量懸架鏡を持つ1つの共振器を用いた実験を行っている。そのセットアップを用いて、共振器の性能評価、レーザー周波数安定化系の開発、パワーの増幅に伴う共振器の回転方向不安定性の制御による緩和の確認を行った。
- 本研究で用いるようなアクチュエーターを持っていない鏡を持つ共振器の回転方向不安定性の緩和の実証は世界初である。
- 本日の修士論文審査会では、主に共振器の回転方向不安定性の緩和実験について説明する。

本日の流れ

1. 研究動機
2. 重力波検出器と量子雑音
3. 量子雑音観測のための実験設計
4. 実験方法と結果
5. まとめ

研究動機

1. 研究動機

1. 重力波

2. レーザー干渉計型重力波検出器KAGRA

2. 重力波検出器と量子雑音

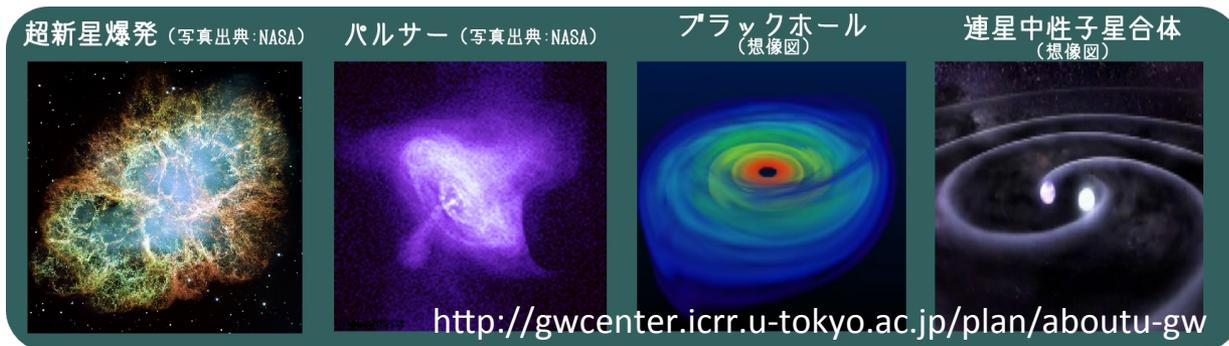
3. 量子雑音観測のための実験設計

4. 実験方法と結果

5. まとめ

重力波

- 重力波 = 一般相対性理論のなかで存在が予言された時空の歪みが伝播する現象
- 観測可能な大きさの重力波を放出する重力波源
 - ブラックホール連星合体や中性子星連星合体
 - 超新星爆発
 - 孤立したパルサー (=高速で回転する中性子星)



- 重力波直接観測の意義
 - 電磁波観測では分からない天体現象の詳細の解明
 - 強重力場下、超高密度下における物理法則の検証
- 2015年に、Advanced LIGOが、重力波による時空の歪みを世界で初めてとらえた = 重力波の世界初検出

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

- KAGRAには、2つの大きな特長がある。
 - 地下に建設
 - 重力波と相互作用させる鏡とその懸架系 (の一部) を20 Kに冷却
- KAGRAの目標感度は、レーザーの量子ゆらぎに起因する量子雑音で制限されている。
- KAGRAでは、ポンデロモーティブスキューミングを受けた光をホモダイン検波するという技術 (未実証) を用いて量子雑音を低減し、標準量子限界を超えた感度を実現する。

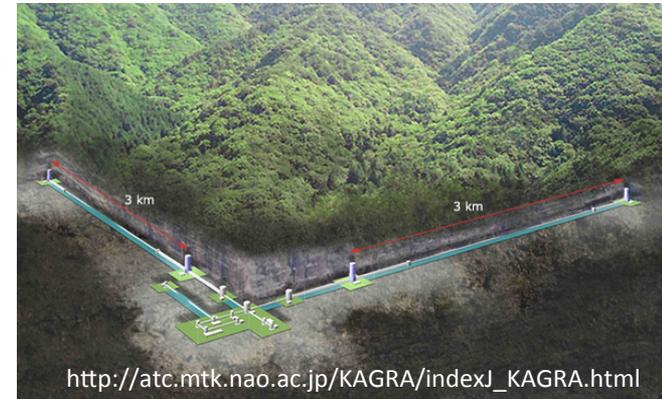


図: KAGRAのイメージ図。

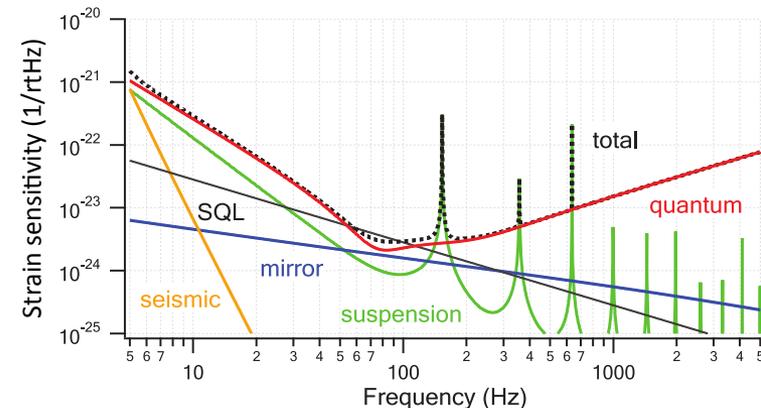


図: KAGRAの目標感度。

→ KAGRAの目標感度の達成およびさらなる感度向上のために、量子雑音低減技術の実証が必要である。

重力波検出器と量子雑音

1. 研究動機

2. 重力波検出器と量子雑音

1. レーザー干渉計型重力波検出器による重力波検出
2. レーザー干渉計型重力波検出器の量子雑音
3. 輻射圧雑音の低減

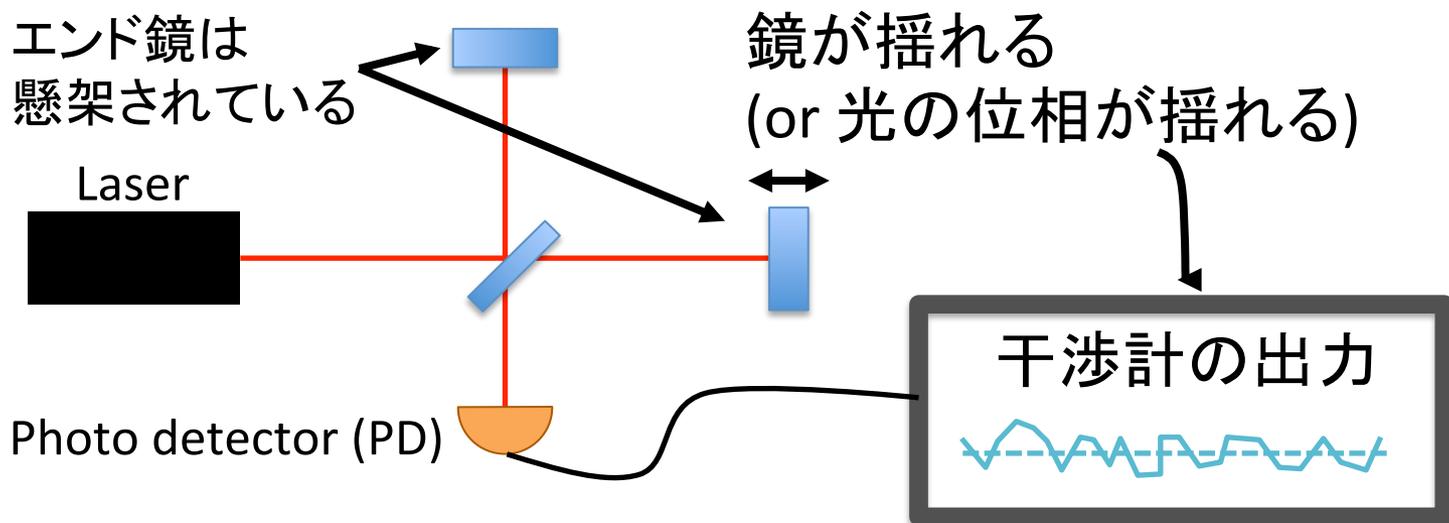
3. 量子雑音観測のための実験設計

4. 実験方法と結果

5. まとめ

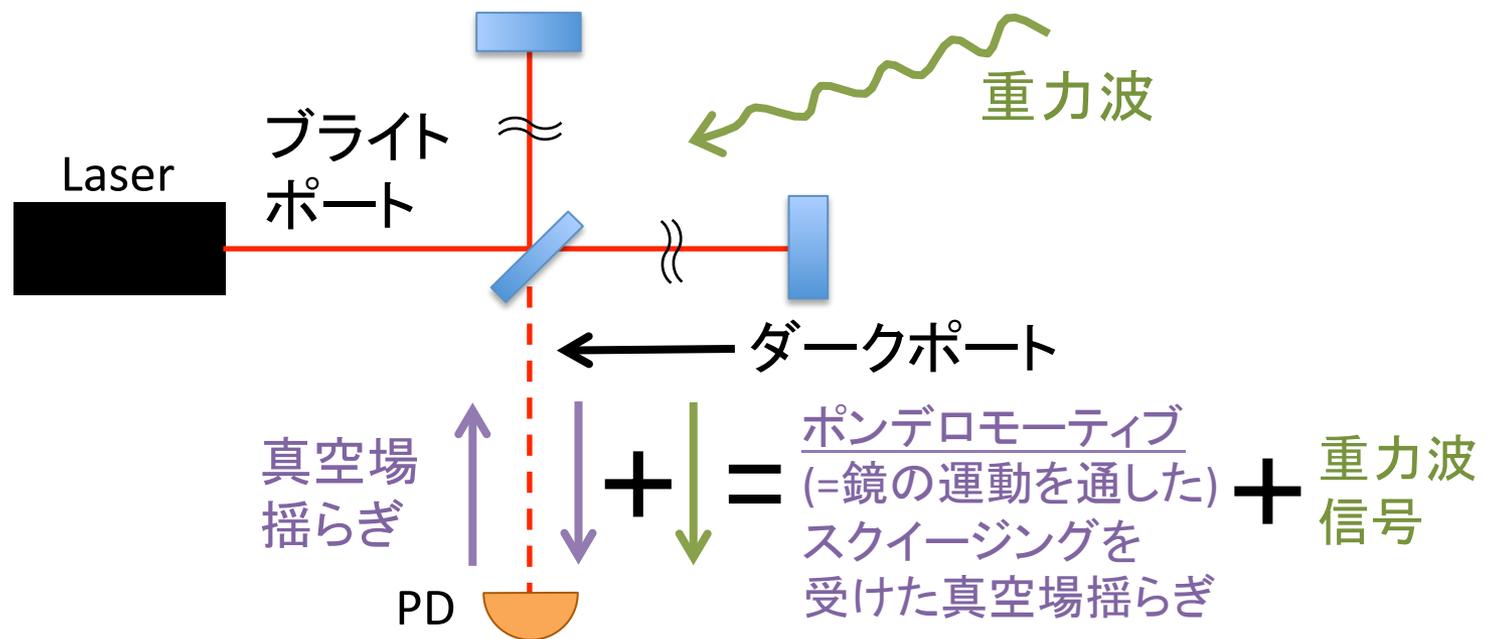
レーザー干渉計型重力波検出器

- レーザー干渉計型重力波検出器の基本は、鏡が懸架されているMichelson干渉計。
- Michelson干渉計とは、
 - = 両腕の位相変化を強度変化として読み出す装置
 - = 腕内の位相揺らぎが干渉計信号(もしくは雑音)になる



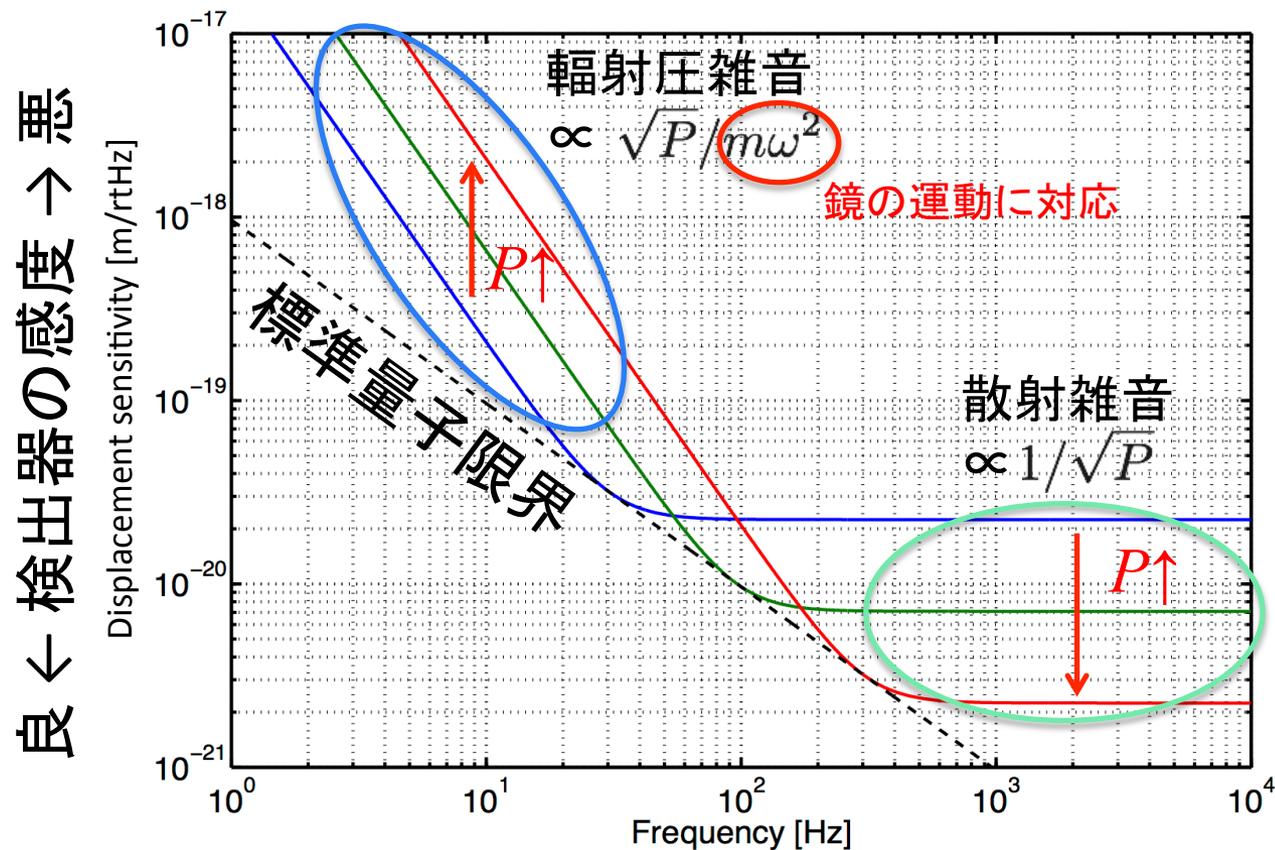
重力波検出器の量子雑音

- 重力波検出器における量子雑音
= 干渉計の信号取得ポート (=ダークポート) から入射する真空場揺らぎが原因となっている。



重力波検出器の量子雑音

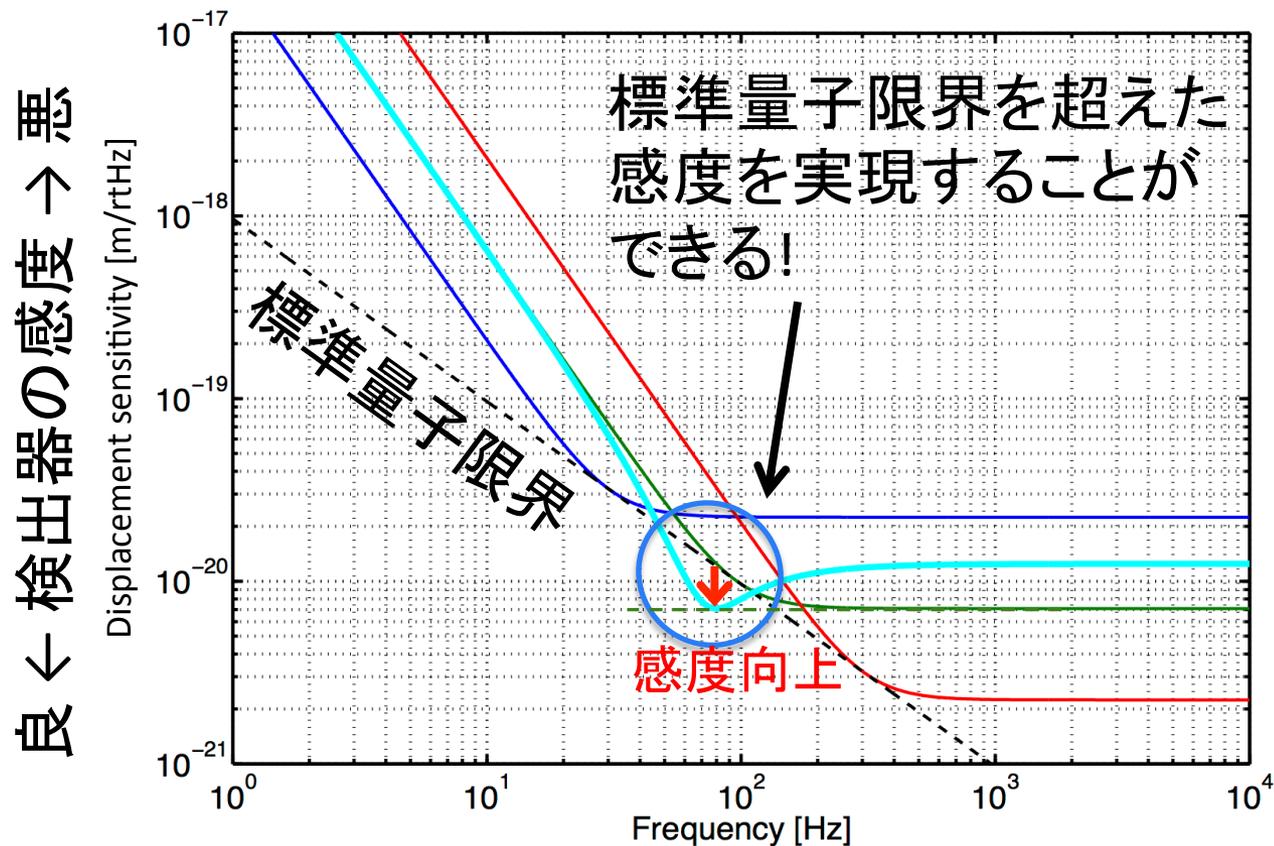
- 通常重力波検出器の量子雑音



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

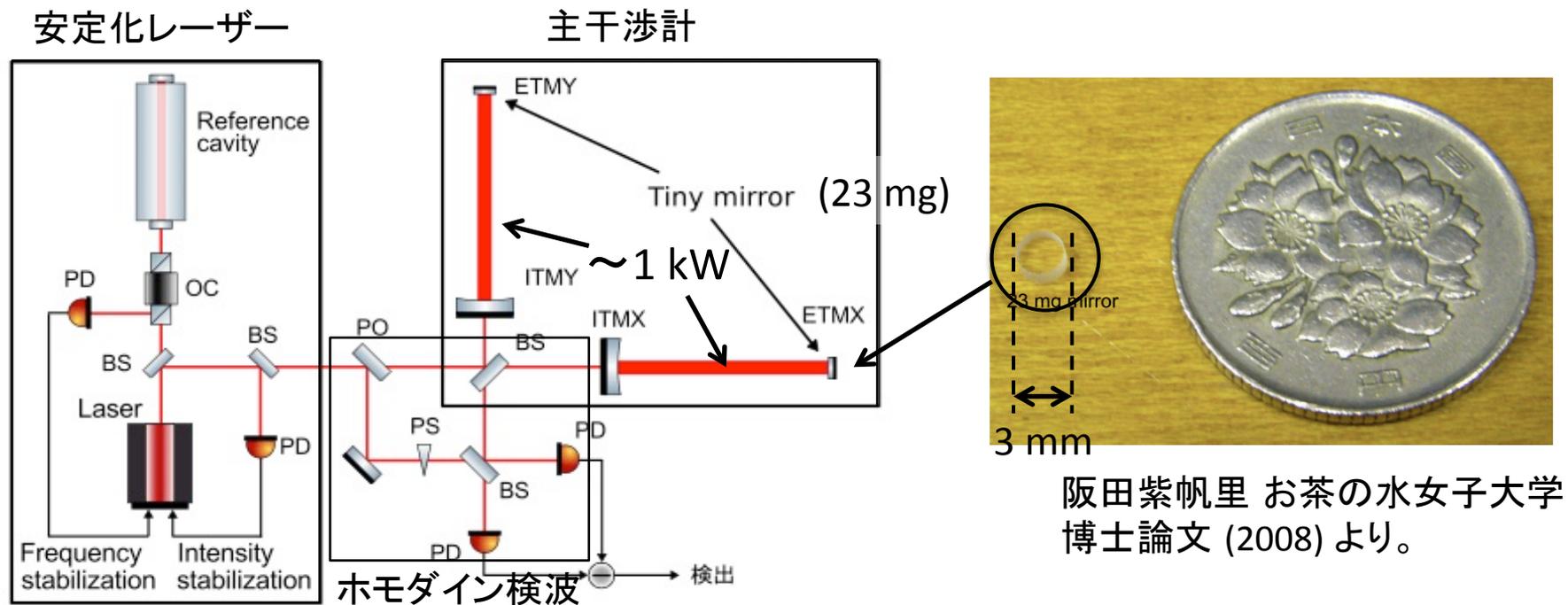


量子雑音観測のための実験設計

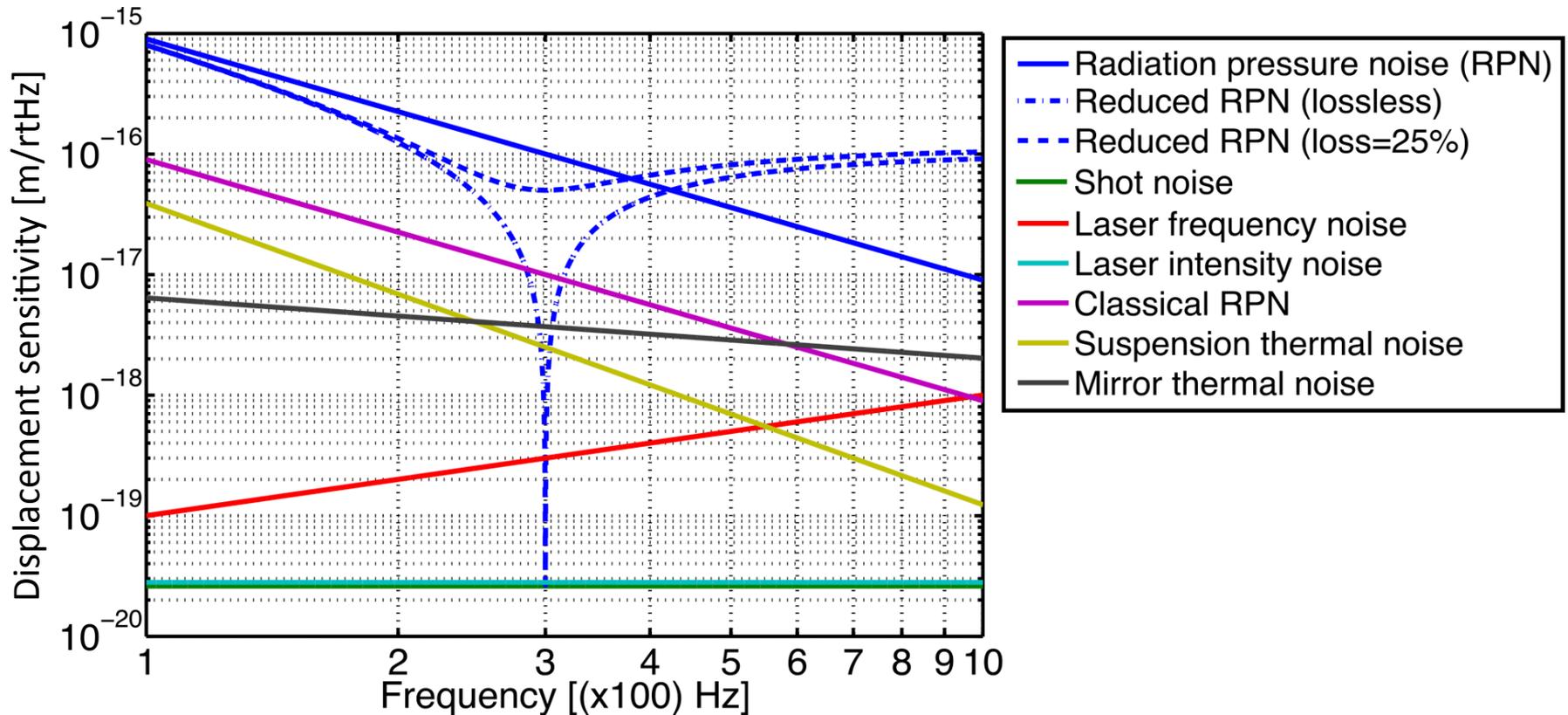
1. 研究動機
2. 重力波検出器と量子雑音
3. **量子雑音観測のための実験設計**
4. 実験方法と結果
5. まとめ

輻射圧雑音観測のための干渉計の設計

- 基本的には、KAGRAの光学設計と類似したFabry-Pérot Michelson干渉計を用いる。
- 本研究では、干渉計の腕共振器のエンド鏡に23 mgの軽量鏡を用いて輻射圧雑音を増幅していることが特長。(KAGRAの輻射圧雑音より約 10^4 倍大きくなる。)



輻射圧雑音観測のための干渉計の設計



- 観測帯域は100-1000 Hzとする。
- その間では、輻射圧雑音が支配的になる設計。

輻射圧雑音観測のための干渉計の設計

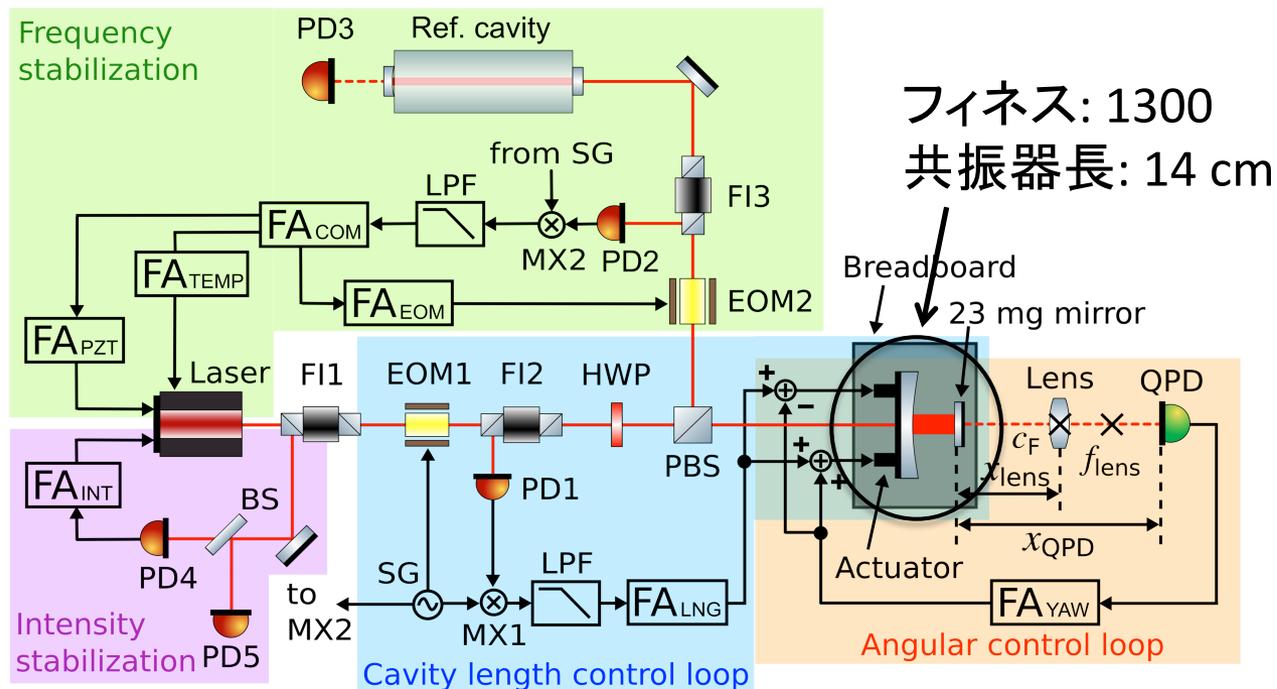
- 前ページの感度を達成するためには、
 - 懸架軽量鏡を含む共振器の性能評価
 - レーザー光源の安定化
 - 腕共振器内パワー ~1 kWの達成が必要である。
- 特に3つ目については、共振器内パワーを上げていくと、共振器が回転方向に不安定になるという問題を解決する必要がある(後述)。
- この不安定性は、本研究セットアップにおいては、エンド鏡が小さいために磁石等を用いて直接制御することができないので、大きな問題である

実験方法と結果

1. 研究動機
2. 重力波検出器と量子雑音
3. 量子雑音観測のための実験設計
- 4. 実験方法と結果**
 1. 実験セットアップ
 2. 共振器の回転方向不安定性
 3. 回転方向不安定性の緩和
5. まとめ

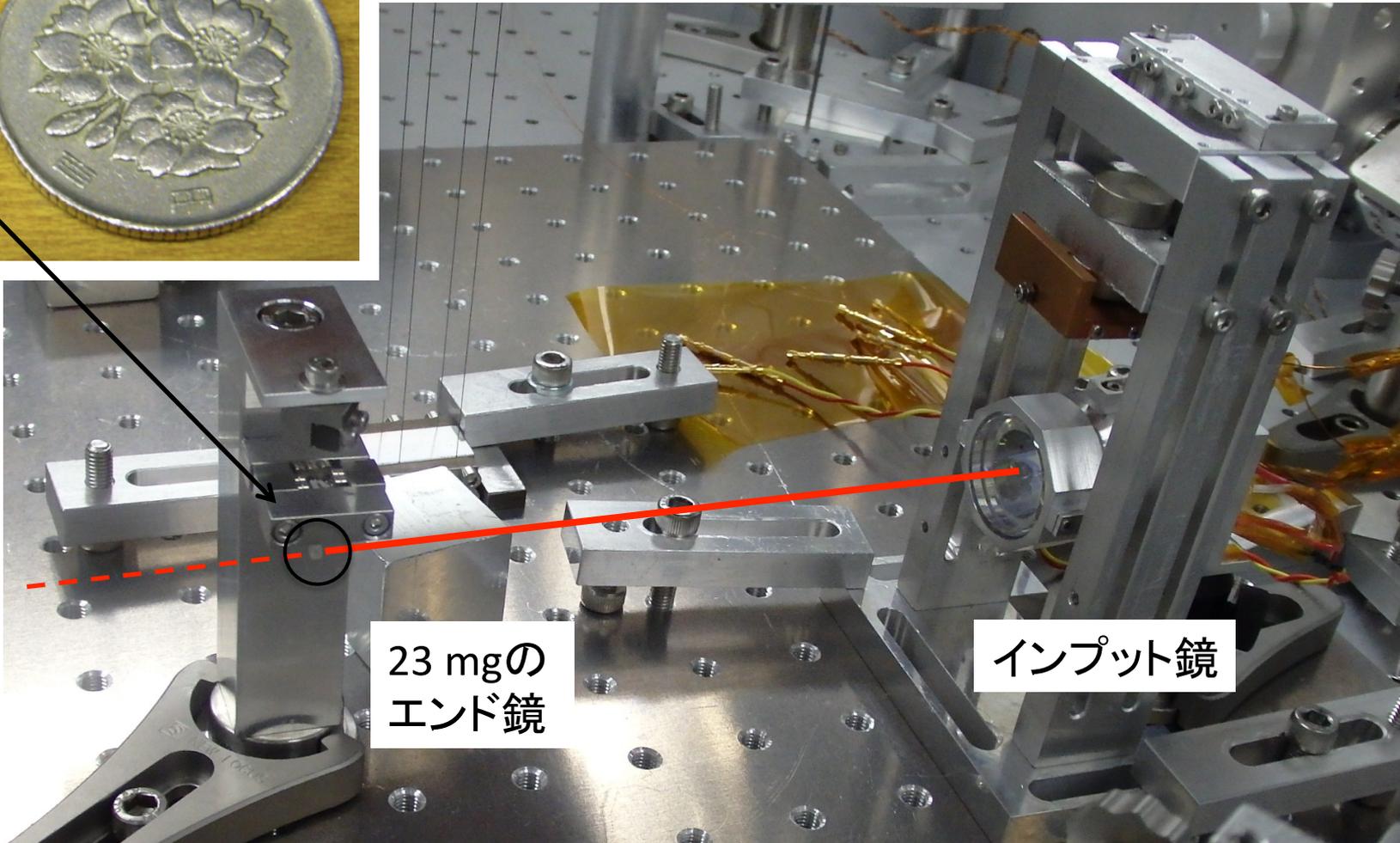
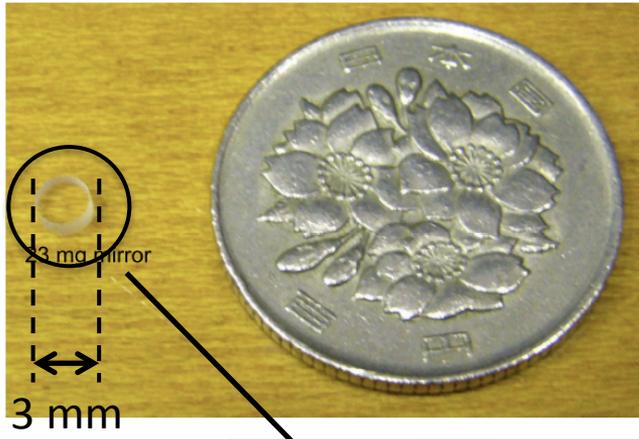
実験セットアップ

- 現在は、23 mg の軽量懸架鏡を持つ1つの Fabry-Pérot 共振器を用いて、既に構築されている実験セットアップの性能評価と問題点の洗出と解決のための実験を行っている。



軽量鏡を持つ共振器

阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。



23 mgの
エンド鏡

インプット鏡

実験

- これまでに、
 - 共振器の感度がレーザー光源の周波数揺らぎに起因する周波数雑音に制限されている
 - 輻射圧雑音増幅のために共振器内レーザーパワーを上げていくと、共振器が回転方向に不安定になるという問題があることが分かっていた。
- そこで、本研究では、
 - 周波数安定化系の開発
 - 共振器の回転方向不安定性の制御による緩和技術の実証を行った。

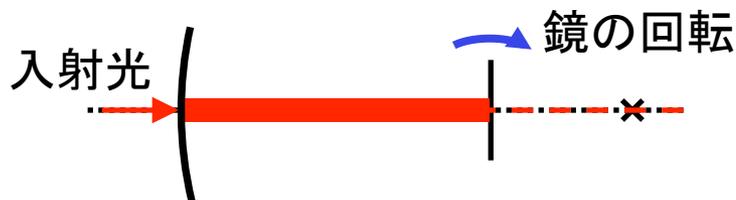
実験

- これまでに、
 - 共振器の感度がレーザー光源の周波数揺らぎに起因する周波数雑音に制限されている
 - 輻射圧雑音増幅のために共振器内レーザーパワーを上げていくと、共振器が回転方向に不安定になるという問題があることが分かっていた。
 - そこで、本研究では、
 - 周波数安定化系の開発
 - 共振器の回転方向不安定性の制御による緩和技術の実証
- を行った。 **本日の修士論文審査会の主な話題**

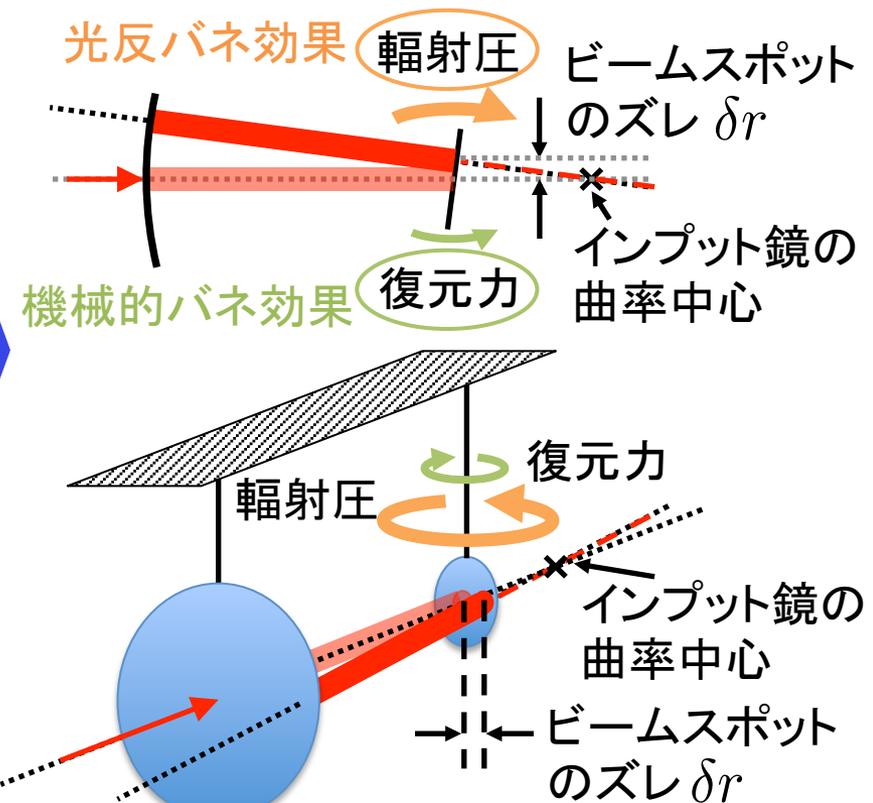
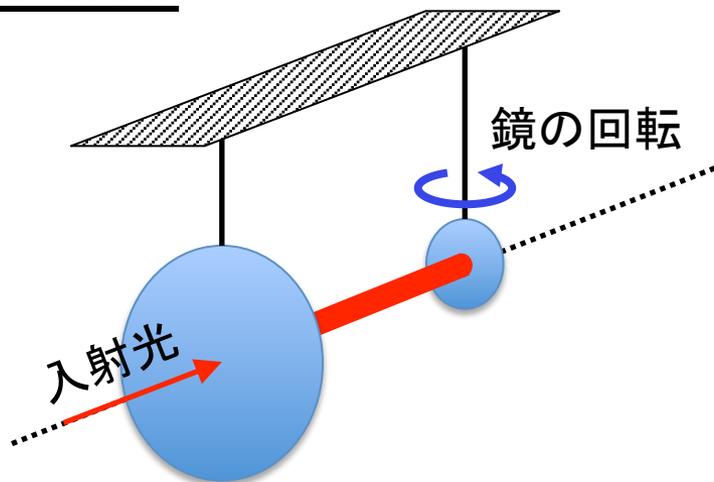
共振器の回転方向不安定性

- 共振器内パワーが大きくなると、鏡の回転方向の不安定性が大きくなり、共振器内パワーを上げられない。
- この不安定性をSidles—Sigg不安定性と呼ぶ。

Top view

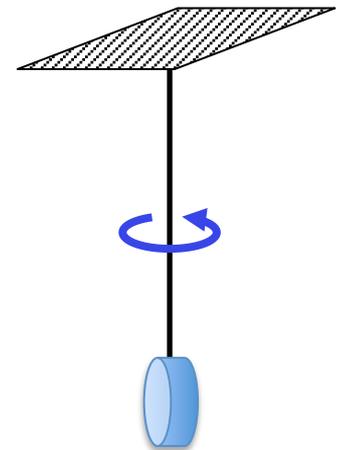


3D view

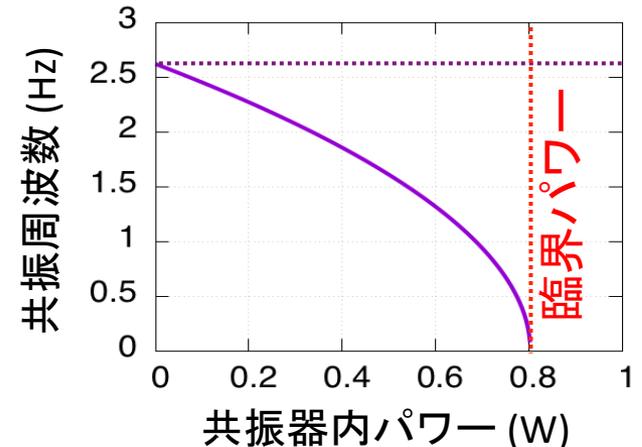
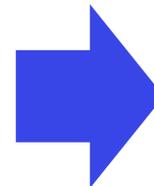
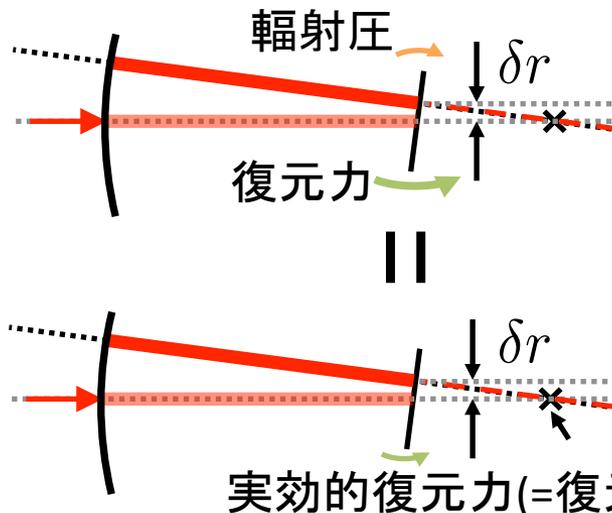


共振器の回転方向不安定性

- 光反バネ効果が機械的バネ効果より小さい場合は何が起きるか?
- 鏡に加わる実効的な復元力が弱くなるため、鏡に入射するパワーが大きくなるにつれて回転方向の共振周波数が低下する。
 - 共振周波数が丁度ゼロになる (=光反バネ効果と機械的バネ効果の大きさが等しくなる) ようなパワーを臨界パワーと呼ぶ。



対象としている回転



共振器の回転方向不安定性

- 輻射圧雑音観測のために、Sidles—Sigg不安定性を緩和したい。
- そのため、以下の実験を行った。
 1. Sidles—Sigg不安定性の原因となる光反バネ効果を精度良く測定
 2. 回転方向制御を導入し光反バネ効果の低減を確認
 3. 同様の制御によりSidles—Sigg不安定性が緩和されることを確認

光反バネ効果の測定

- エンド鏡の復元力によるバネ効果と輻射圧による光反バネ効果 (=Sidles—Sigg不安定性の原因) を合わせた実効的なバネ定数を、つまり、エンド鏡の実効的共振周波数を測定したい。
- しかし、エンド鏡が小さいために磁石等を取り付けることができず、エンド鏡を直接励起することができない。

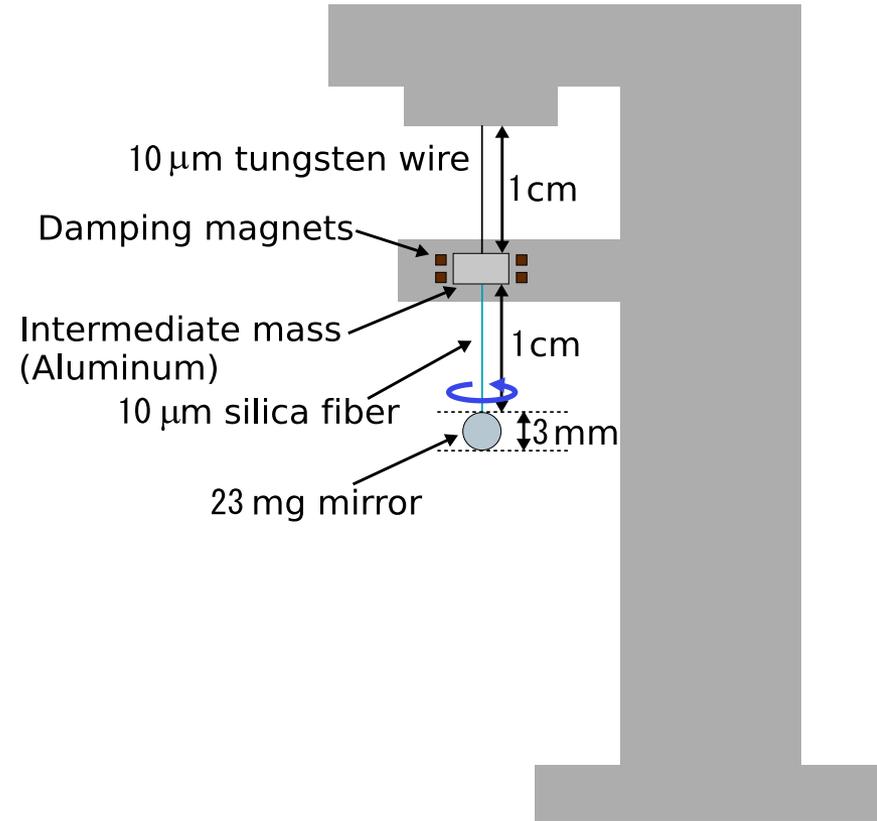
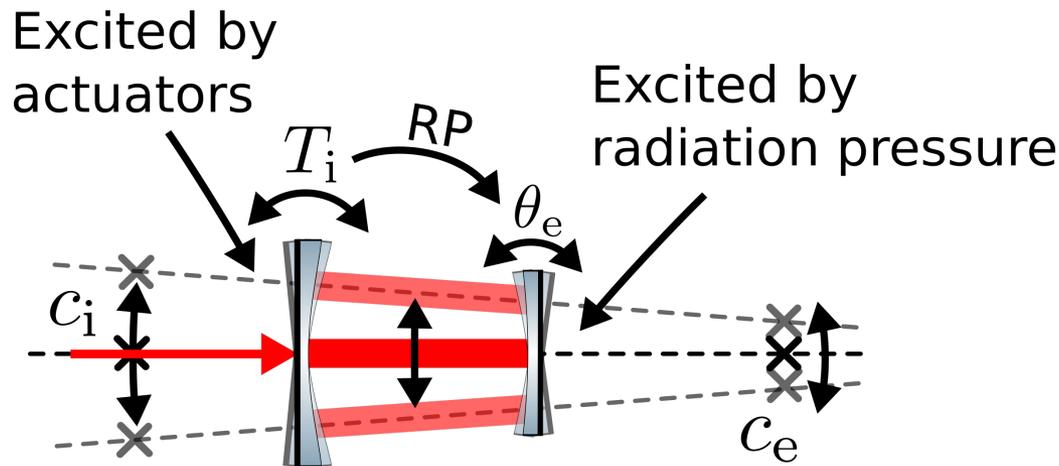


図: エンド鏡懸架系の模式図。

光反バネ効果の測定

- そのため、共振周波数を測定するために、遠隔励起という新しい手法を考案した。
 - 遠隔励起とは、直接励起できないエンド鏡の代わりにインพุット鏡の回転運動を励起して、共振器軸をずらして輻射圧を使ってエンド鏡にトルクを加えて、エンド鏡の回転運動を励起するという方法である。
- 遠隔励起のイメージ図



図：遠隔励起のイメージ図。

光反バネ効果の測定

遠隔励起の原理

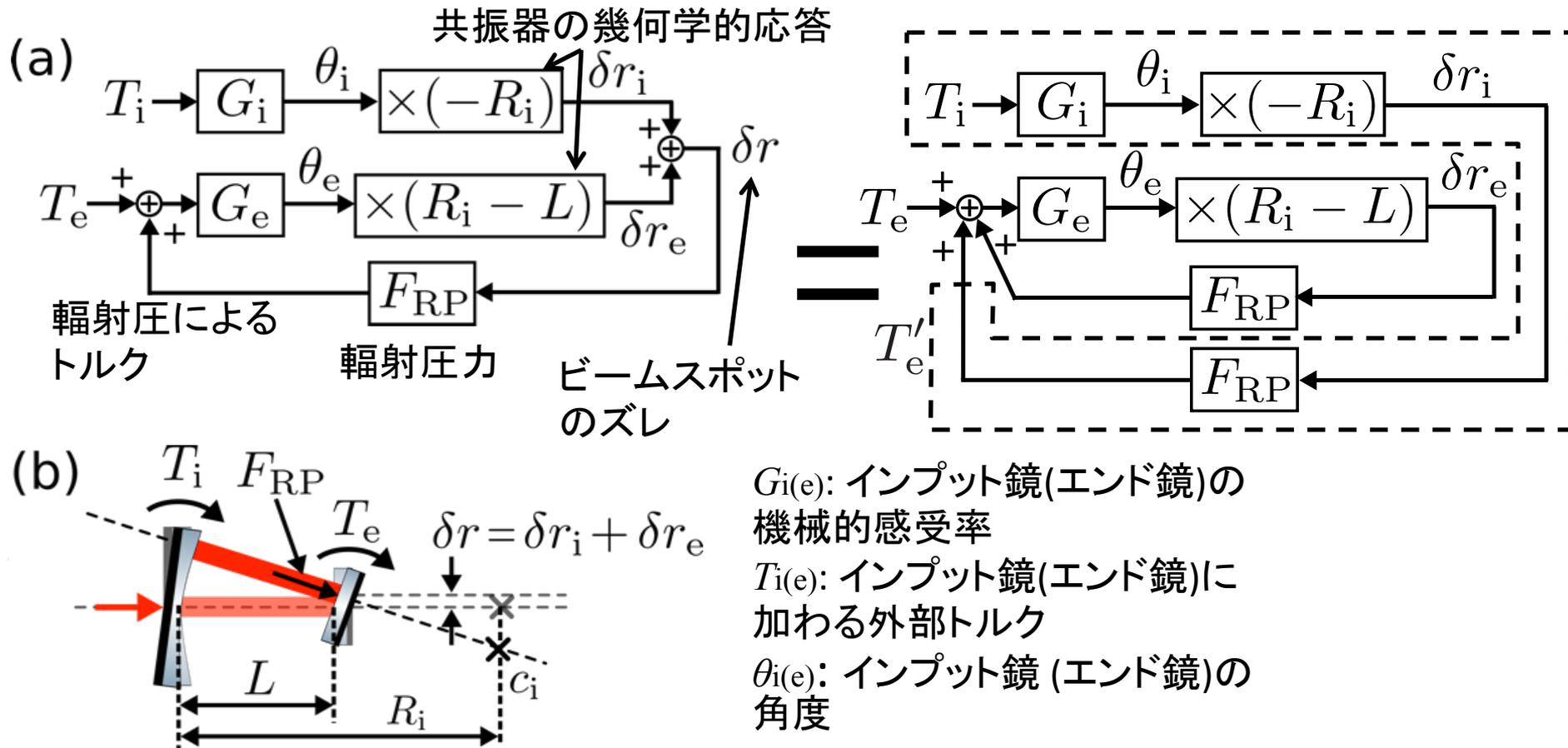
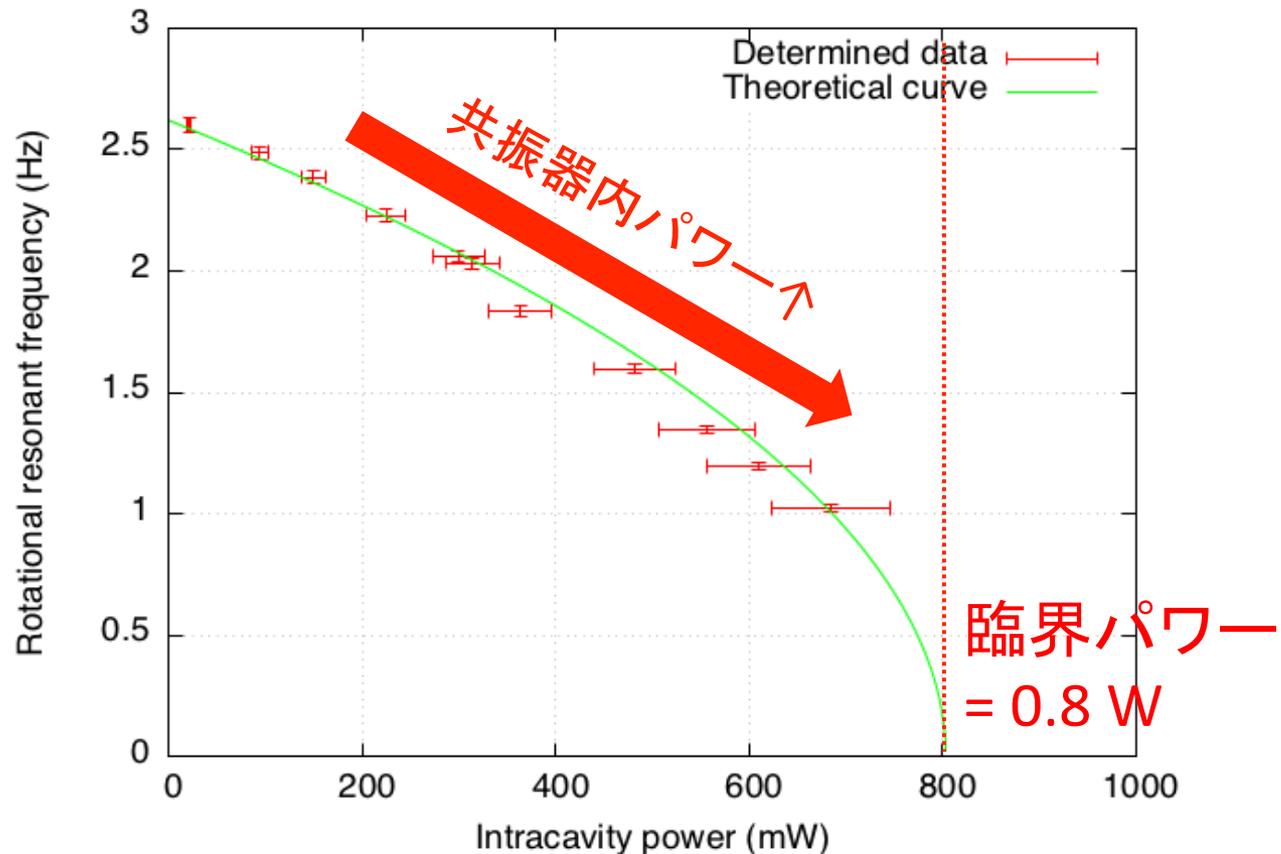


図: 遠隔励起のブロック図

光反バネ効果の測定



- パワーの上昇による共振周波数の低下 (=光反バネ効果の増幅) が精度良く測定できた。

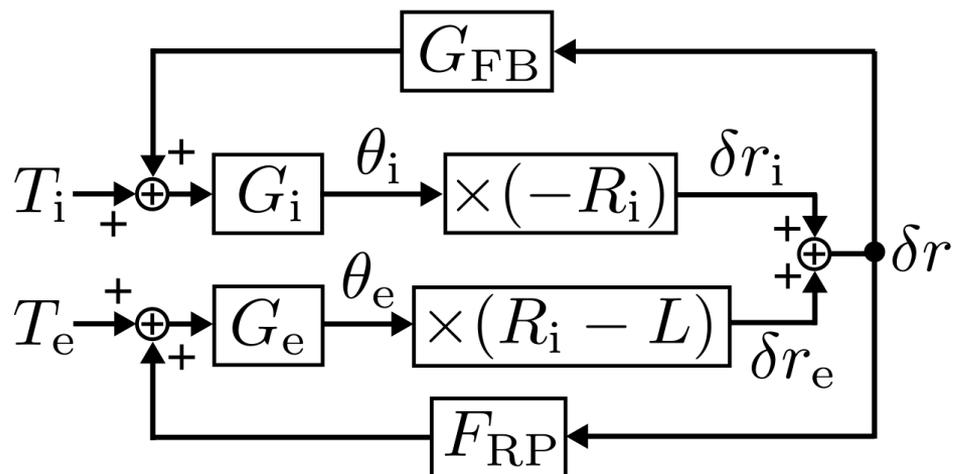
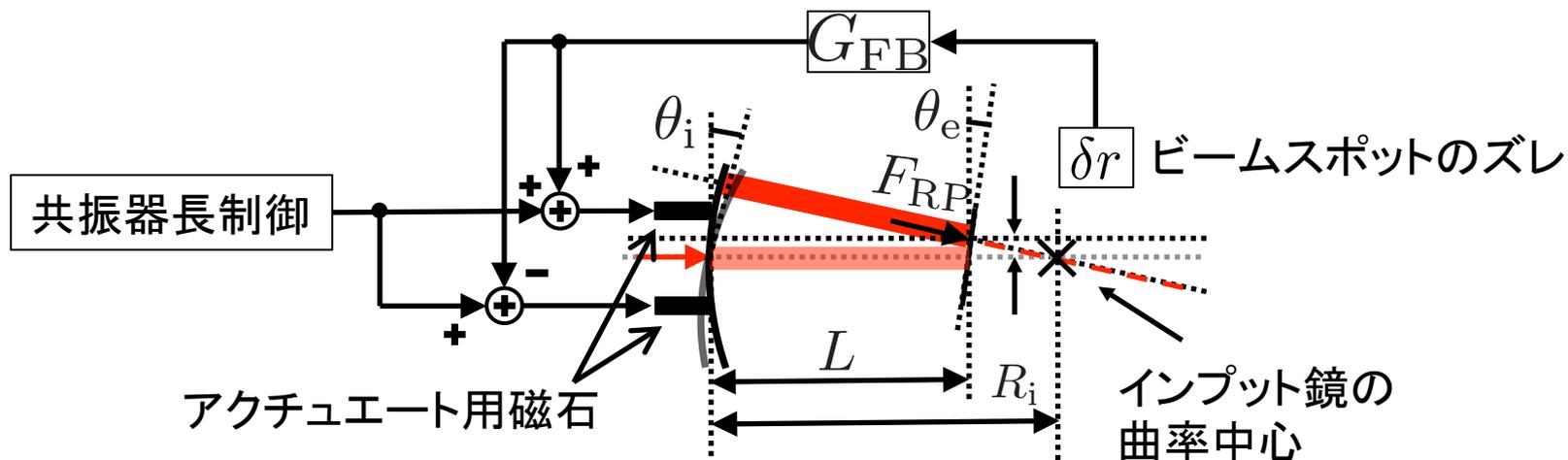
(この結果は、K.Nagano et al., Phys. Lett. A, **380**, 983 (2016) で報告されている。)

共振器の回転方向制御

- Sidles—Sigg不安定性を緩和するために、鏡の回転運動を制御したい。
- しかし、エンド鏡が小さいために磁石等を取り付けることがができず、エンド鏡を直接制御することができない。
- そのため、光反バネ効果の原因となるエンド鏡上でのビームスポットずれを測定し、インプット鏡の回転運動にフィードバックして、そのずれを抑制する制御が考案された(次ページ以降で説明する)。
- これまでの先行研究で、この制御法が有効であるという兆候はあったが、実際にSidles—Sigg不安定性を緩和されるということは確かめられていなかった。

共振器の回転方向制御

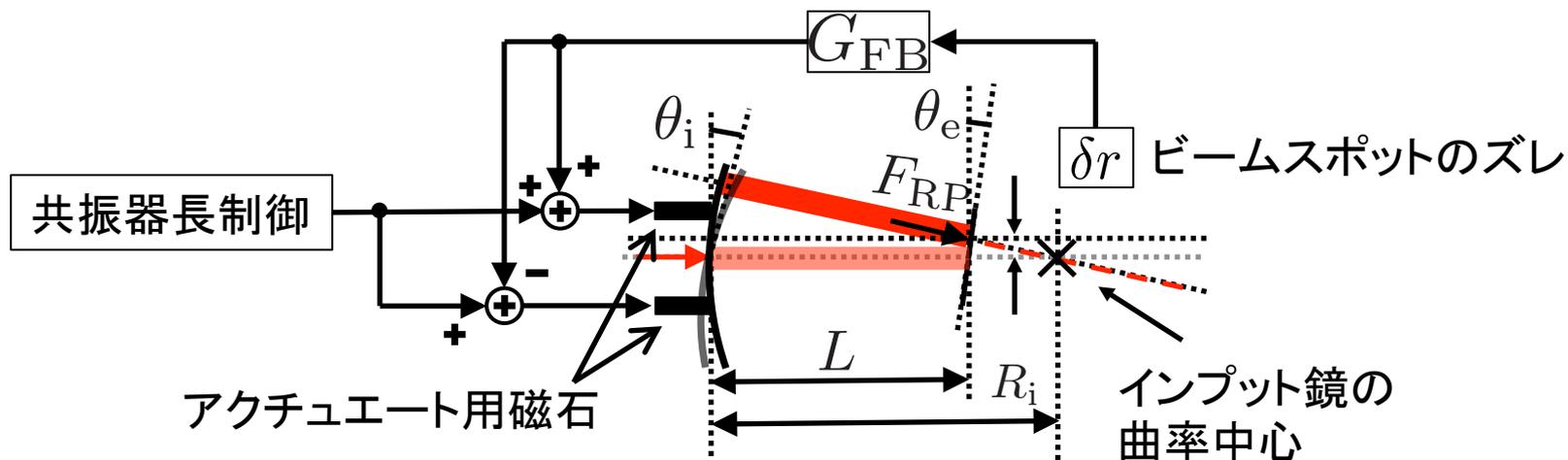
- 回転方向制御の原理



$G_{i(e)}$: インput鏡 (エンド鏡)の機械的感受率
 $T_{i(e)}$: インput鏡 (エンド鏡)に加わる外部トルク

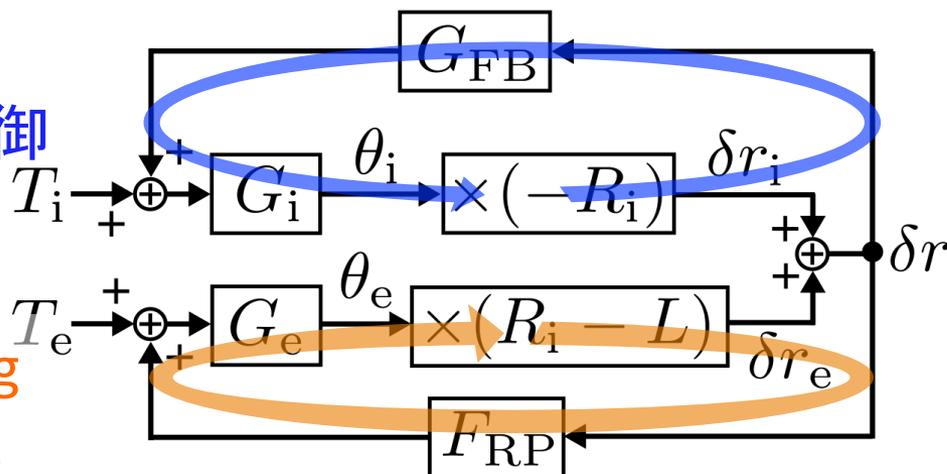
共振器の回転方向制御

- 回転方向制御の原理



回転方向制御

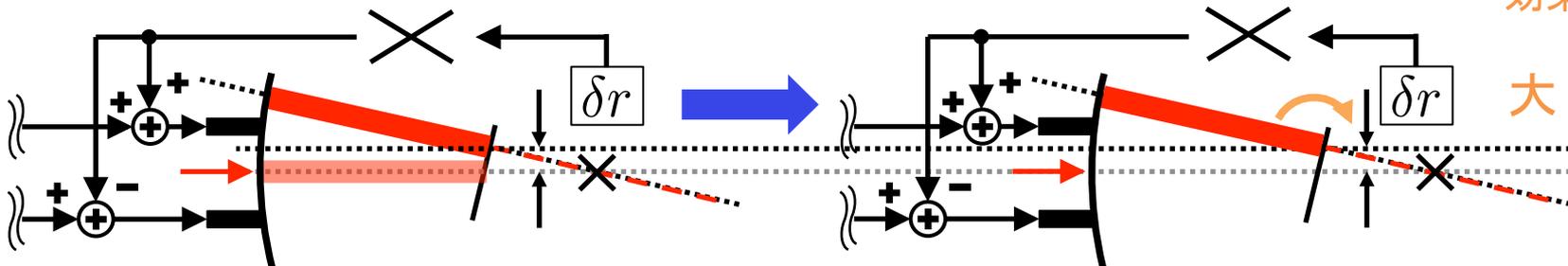
Sidles-Sigg
不安定性



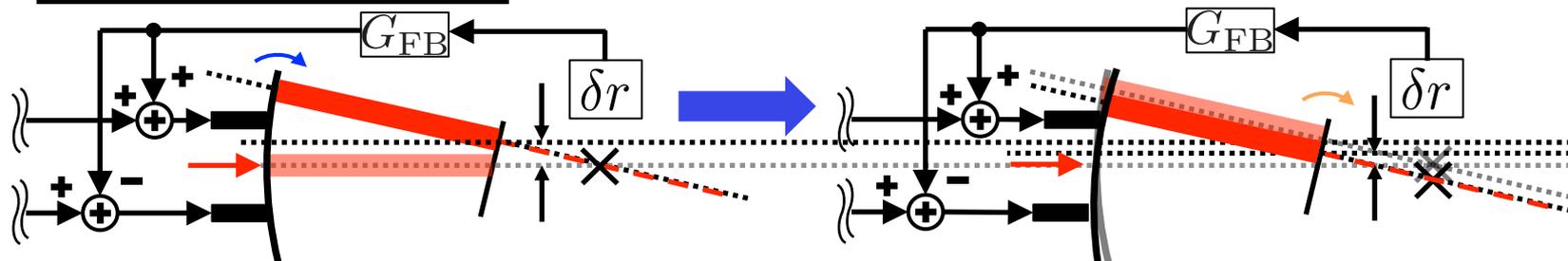
$G_{i(e)}$: 入力鏡 (エンド鏡) の機械的感率
 $T_{i(e)}$: 入力鏡 (エンド鏡) に加わる外部トルク

共振器の回転方向制御

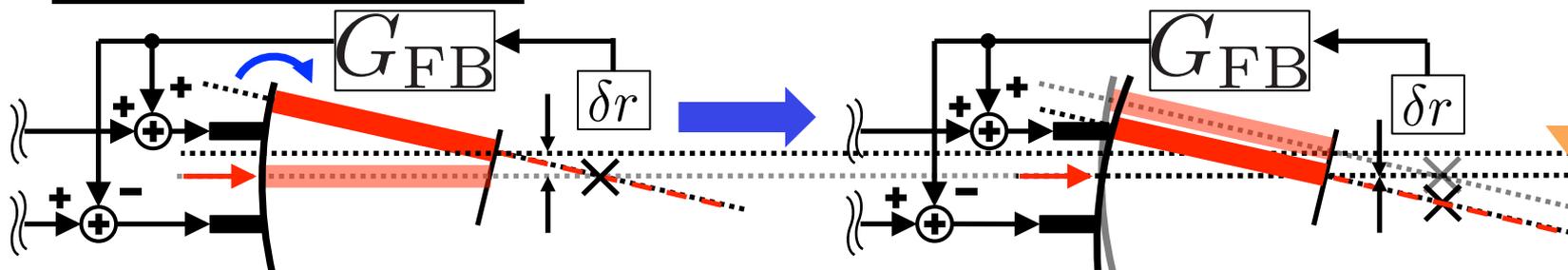
1. フィードバックなし



2. フィードバック弱

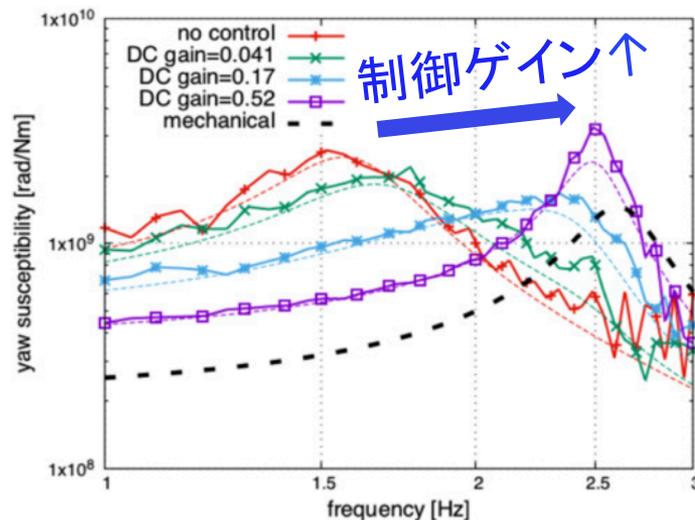


3. フィードバック強

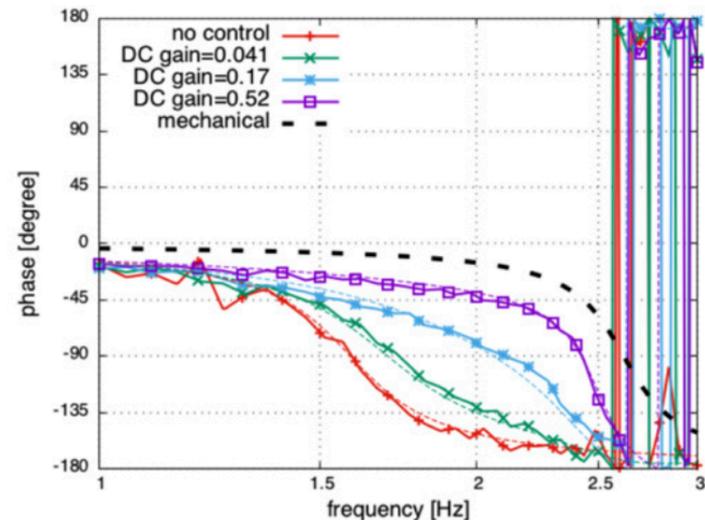


光反バネ効果の低減

- 回転方向制御を導入し、まず(臨界パワー以下で)光反バネ効果が低減されることを確認した。
- 具体的には、エンド鏡の実効的感受率を測定し、光反バネ効果により低下していた回転方向共振周波数が制御を強くすると機械的なものに復元されるのを確認した。



(a)

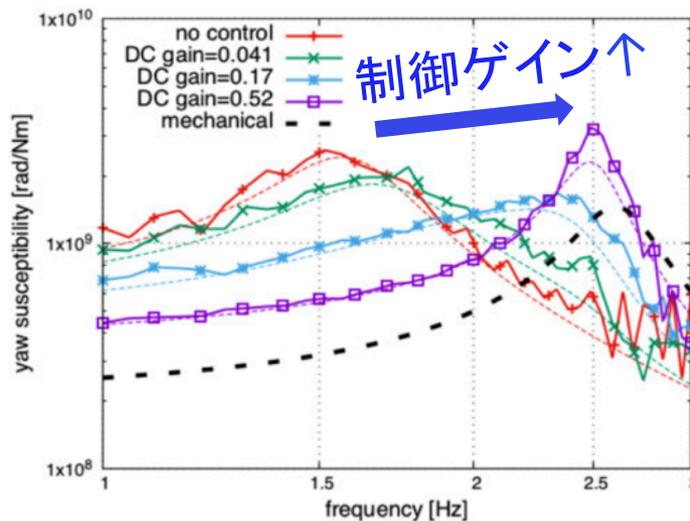


(b)

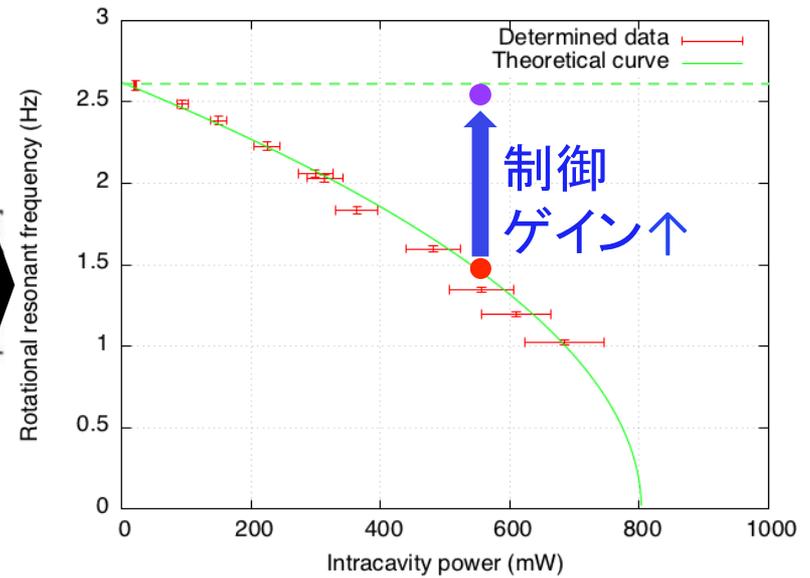
(この結果は、Y.Enomoto, K.Nagano et al., CQG, **33**, 145002 (2016) で報告されている。)

光反バネ効果の低減

- 回転方向制御を導入し、まず(臨界パワー以下で)光反バネ効果が低減されることを確認した。
- 具体的には、エンド鏡の実効的感受率を測定し、光反バネ効果により低下していた回転方向共振周波数が制御を強くすると機械的なものに復元されるのを確認した。



(a)



(b)

(この結果は、Y.Enomoto, K.Nagano et al., CQG, **33**, 145002 (2016) で報告されている。)

回転方向不安定性の緩和

- 制御によってSidles—Sigg不安定性が緩和できることを確かめるために、臨界パワー以上でも共振器が安定になることを確かめたい。
- 何が測定できればよいか？
 1. エンド鏡ループのオープンループ伝達関数
 - 共振器内パワーに依存している。
 2. 制御がある場合とない場合の共振器内パワーの時系列データ
 - あるパワー以上では制御なしでは共振器長が制御できなければ、制御の有効性が確かめられる。

回転方向不安定性の緩和

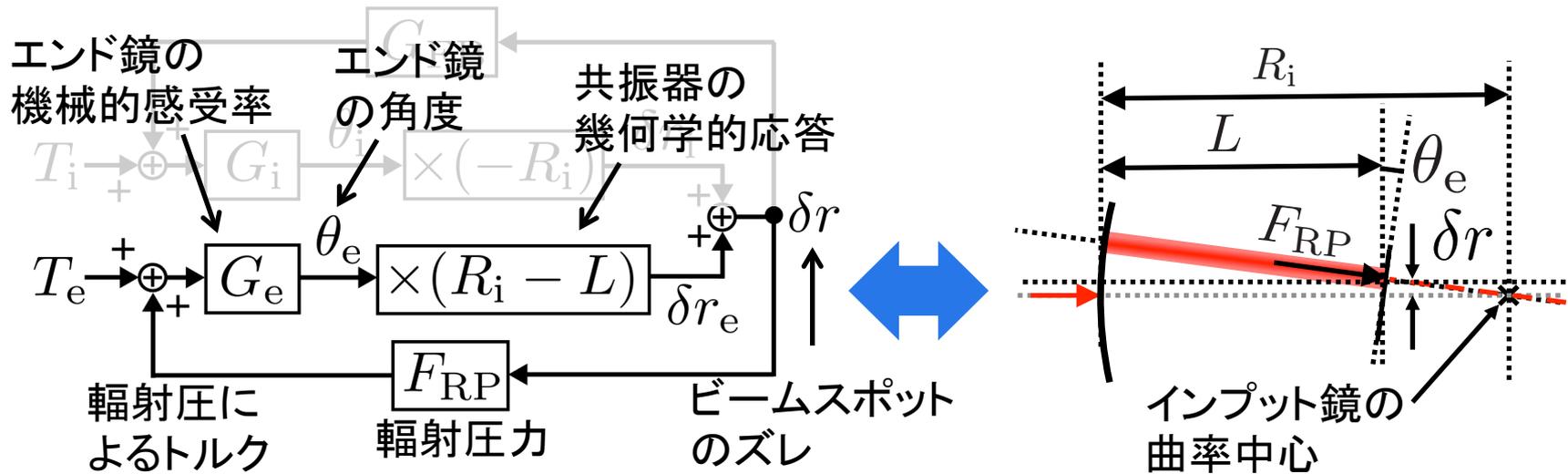
- 制御によってSidles—Sigg不安定性が緩和できることを確かめるために、臨界パワー以上でも共振器が安定になることを確かめたい。
- 何が測定できればよいか？
 - 1. エンド鏡ループのオープンループ伝達関数
 - 共振器内パワーに依存している。
 - 2. 制御がある場合とない場合の共振器内パワーの時系列データ
 - あるパワー以上では制御なしでは共振器長が制御できなければ、制御の有効性が確かめられる。

系の安定性を議論する
のによく用いられる。



回転方向不安定性の緩和

- エンド鏡ループのオープンループ伝達関数



- オープンループ伝達関数は、

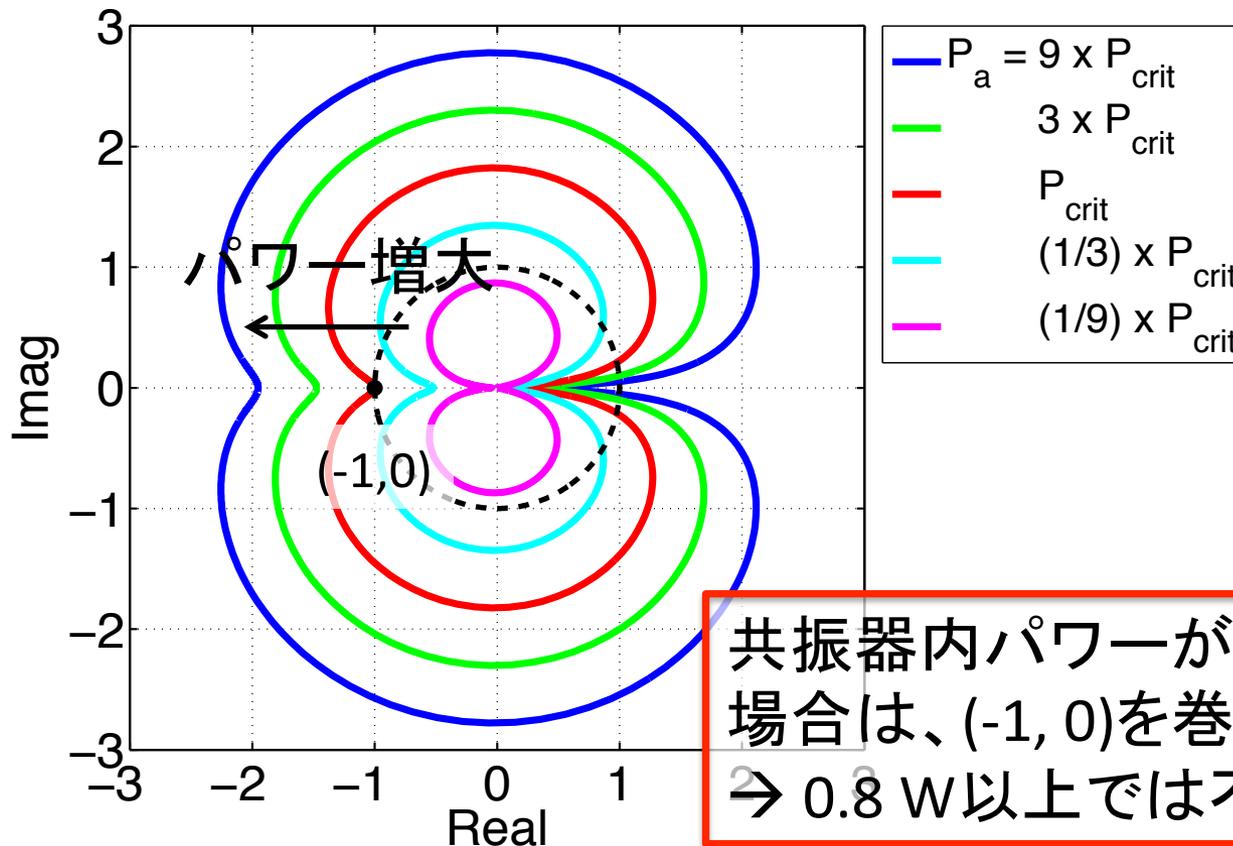
$$G_{\text{EML}} = -G_e(R_i - L)F_{\text{RP}}$$

(オープンループ伝達関数のナイキスト線図 (伝達関数の実部) を横軸、虚部を縦軸にしてプロット) が点(-1,0)を閉曲線内に持っているとは系は不安定、持っていないと安定と判断できる。)

回転方向不安定性の緩和

- G_{EML} のナイキスト線図の理論曲線

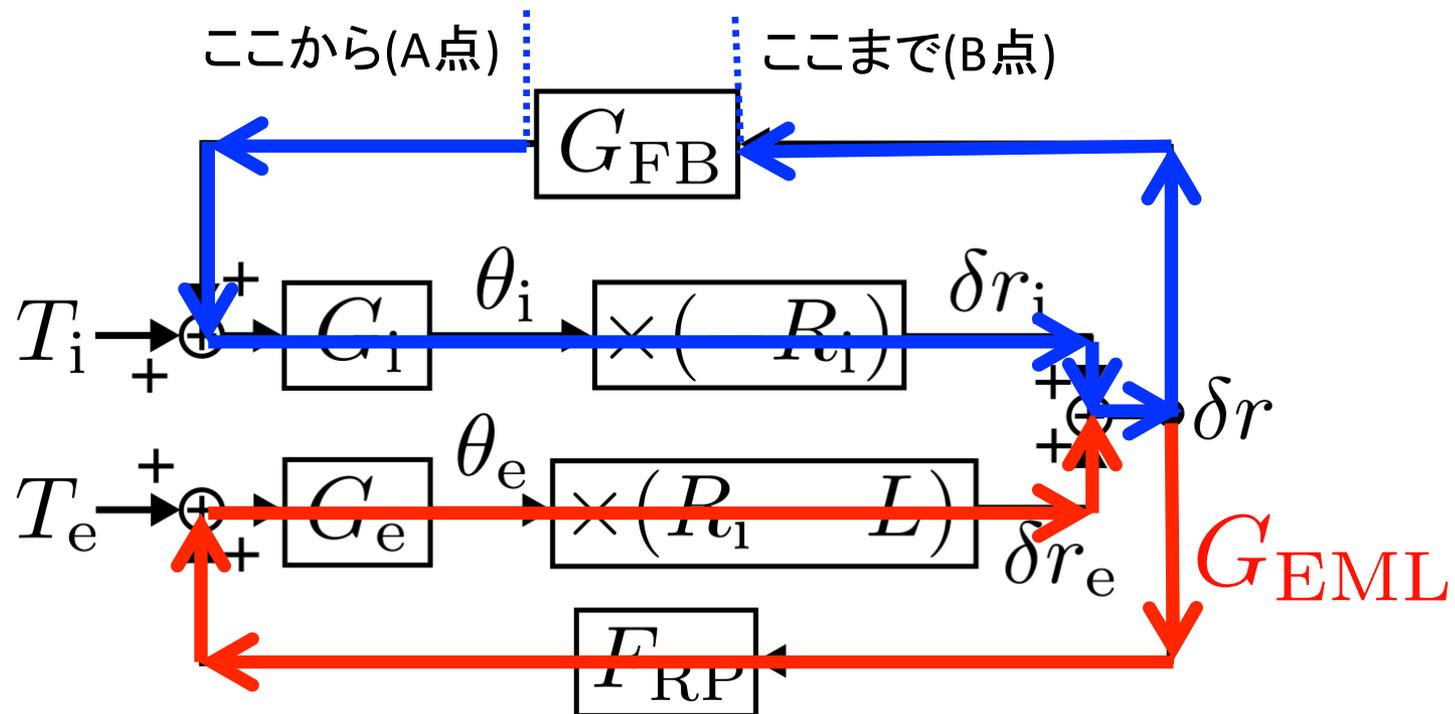
$$G_{EML} = -G_e(R_i - L)F_{RP}$$



回転方向不安定性の緩和

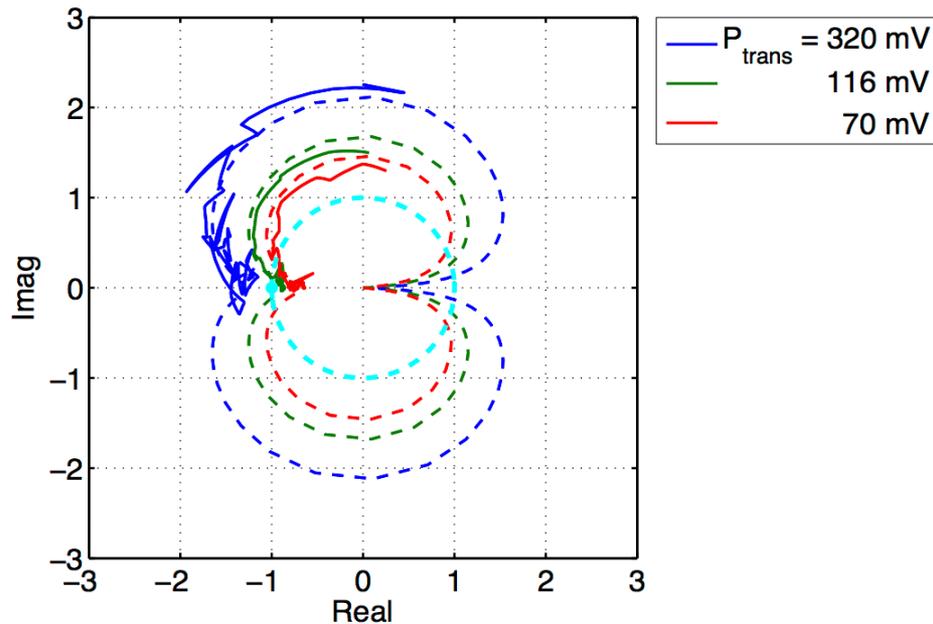
- G_{EML} の測定方法

- A点からB点までの伝達関数を測定すると、その中に G_{EML} の情報が含まれている。



回転方向不安定性の緩和

- G_{EML} の測定結果



- 臨界パワーを超えた不安定になるはずのエンド鏡ループの伝達関数が測定されている。
→ 制御によって共振器が安定になっている。

(この結果は、K.Nagano et al., Phys. Lett. A, **380**, 3871 (2016) で報告されている。)

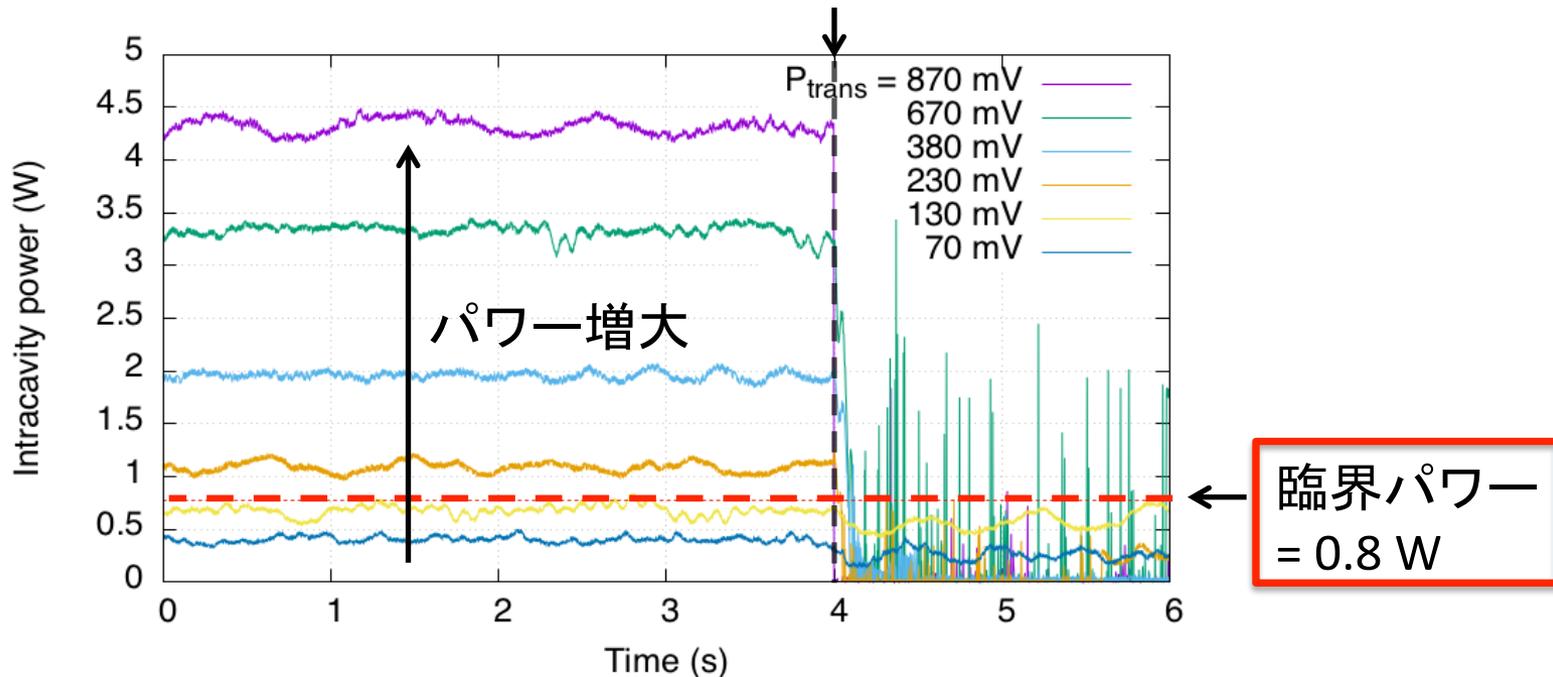
回転方向不安定性の緩和

- 制御によってSidles—Sigg不安定性が緩和できることを確かめるために、臨界パワー以上でも共振器が安定になることを確かめたい。
- 何が測定できればよいか？
 1. エンド鏡ループのオープンループ伝達関数
 - 共振器内パワーに依存している。
 2. 制御がある場合とない場合の共振器内パワーの時系列データ
 - あるパワー以上では制御なしでは共振器長が制御できなければ、制御の有効性が確かめられる。

回転方向不安定性の緩和

- 共振器内パワーの時系列データ

ここで回転方向制御を切っている



- 臨界パワー以上では制御を切ると共振器長の制御が落ちている。

(この結果は、K.Nagano et al., Phys. Lett. A, **380**, 3871 (2016) で報告されている。)

まとめ

1. 研究動機
2. 重力波検出器と量子雑音
3. 量子雑音観測のための実験設計
4. 実験方法と結果
5. **まとめ**

まとめ

- KAGRAの輻射圧雑音低減技術の原理実証実験のために、23 mgの軽量鏡を持つ共振器を用いて以下の実験を行った。
 - 周波数安定化システムの開発
 - 高パワー化に伴うSidles—Sigg不安定性を緩和するための回転方向制御系の実証実験
- 遠隔励起を用いて、光反バネ効果を精度よく測定した。
- 回転方向制御を導入し、その制御ゲインを上げることで、光反バネ効果が低減されることを確認した。
- 同様の回転方向制御により、Sidles—Sigg不安定性を緩和し、臨界パワー以上の共振器内パワーを持つ共振器が安定に運用できることを確認した。
 - 片方の鏡がアクチュエータを持っていない共振器のSidles—Sigg不安定性の緩和は世界初である。

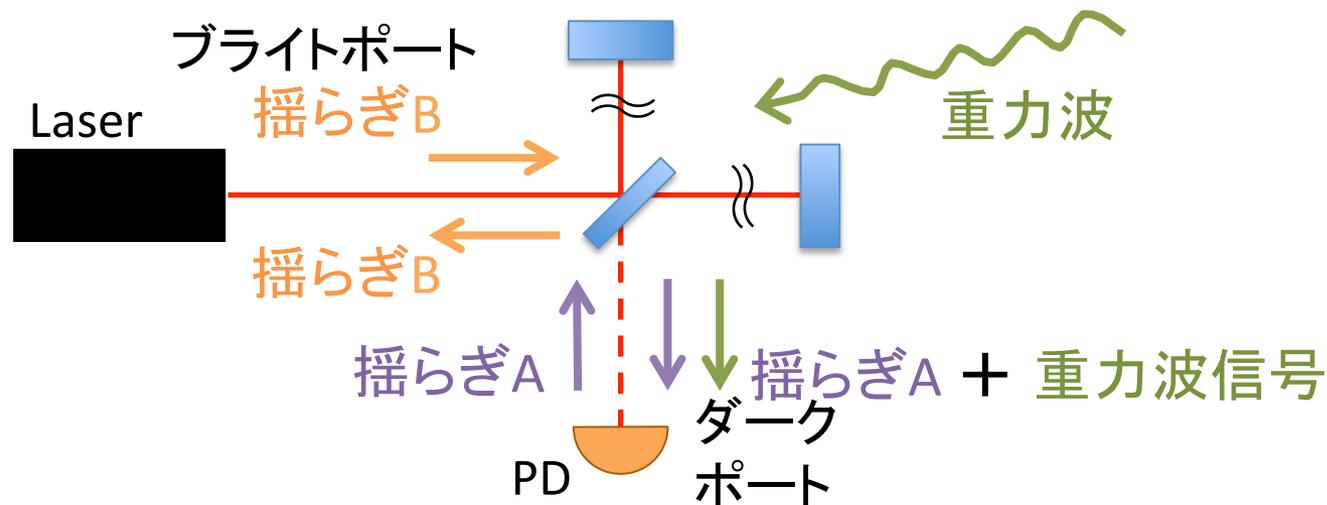
今後の課題

- 輻射圧雑音の観測のためには、
 - 周波数安定化系の制御系の一部改良と、周波数安定度の直接測定が必要
 - 回転方向制御が、輻射圧雑音観測のための要求値 (~1 kW) の共振器内パワーに対しても有効であることの確認が必要
 - 23 mg軽量鏡を持つ共振器の熱雑音の実験的評価が必要
 - 現在の共振器をもう1組用意して、干渉計の構築が必要
- である。

予備

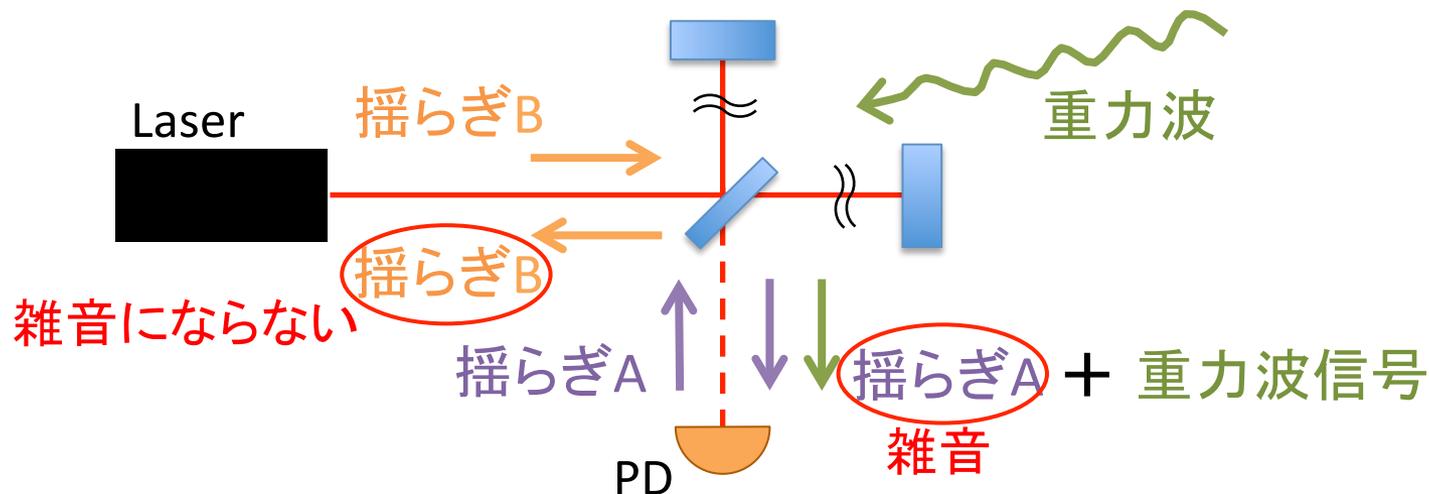
レーザー干渉計型重力波検出器

- 重力波検出器は、下図のように、レーザー入射側が明るく、反対は暗くなるようにして運用される。
 - これをダークフリンジ制御と呼ぶ。
- ダークフリンジ制御下の重力波検出器の特徴
 1. 重力波による干渉計信号はダークポートに現れる
 2. あるポートから入射する揺らぎは同じポートに返ってくる



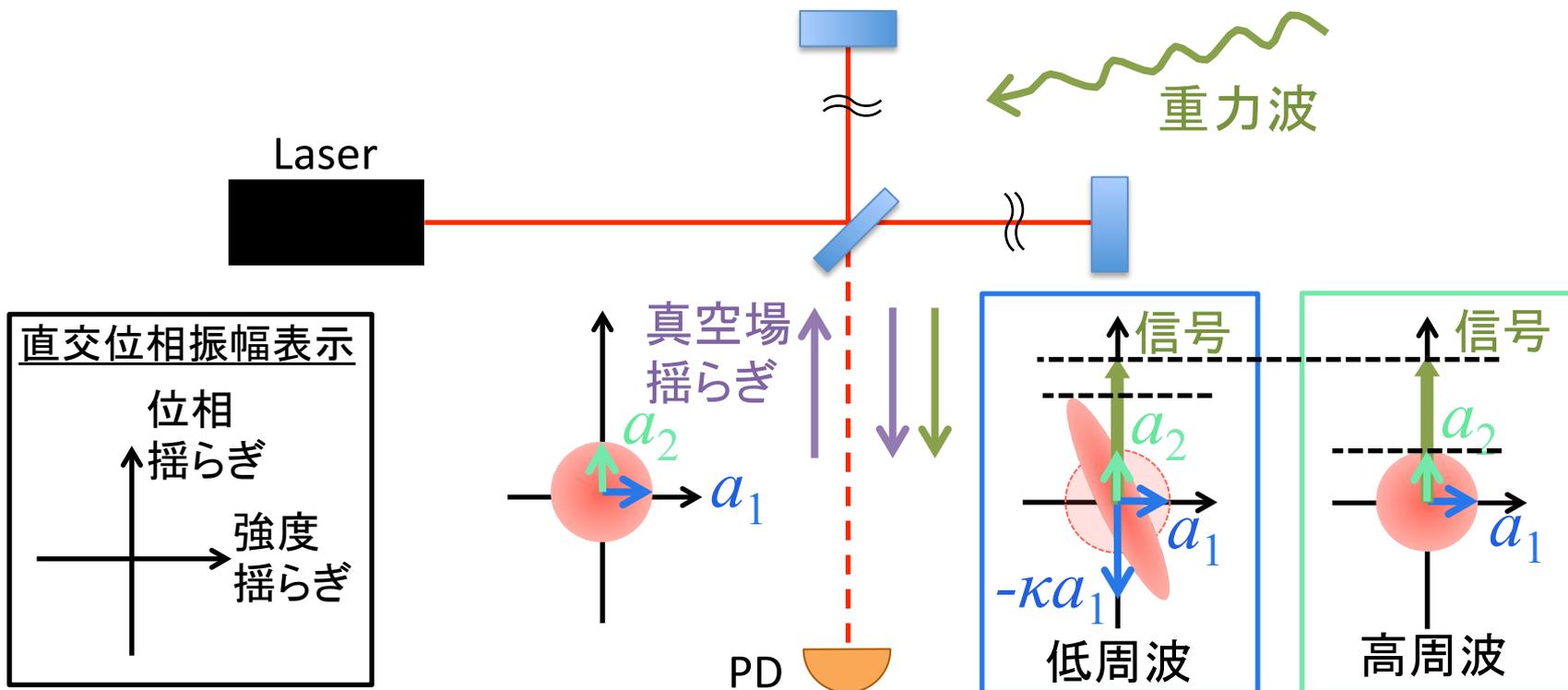
レーザー干渉計型重力波検出器

- 重力波検出器は、下図のように、レーザー入射側が明るく、反対は暗くなるようにして運用される。
 - これをダークフリンジ制御と呼ぶ。
- ダークフリンジ制御下の重力波検出器の特徴
 1. 重力波による干渉計信号はダークポートに現れる
 2. あるポートから入射する揺らぎは同じポートに返ってくる



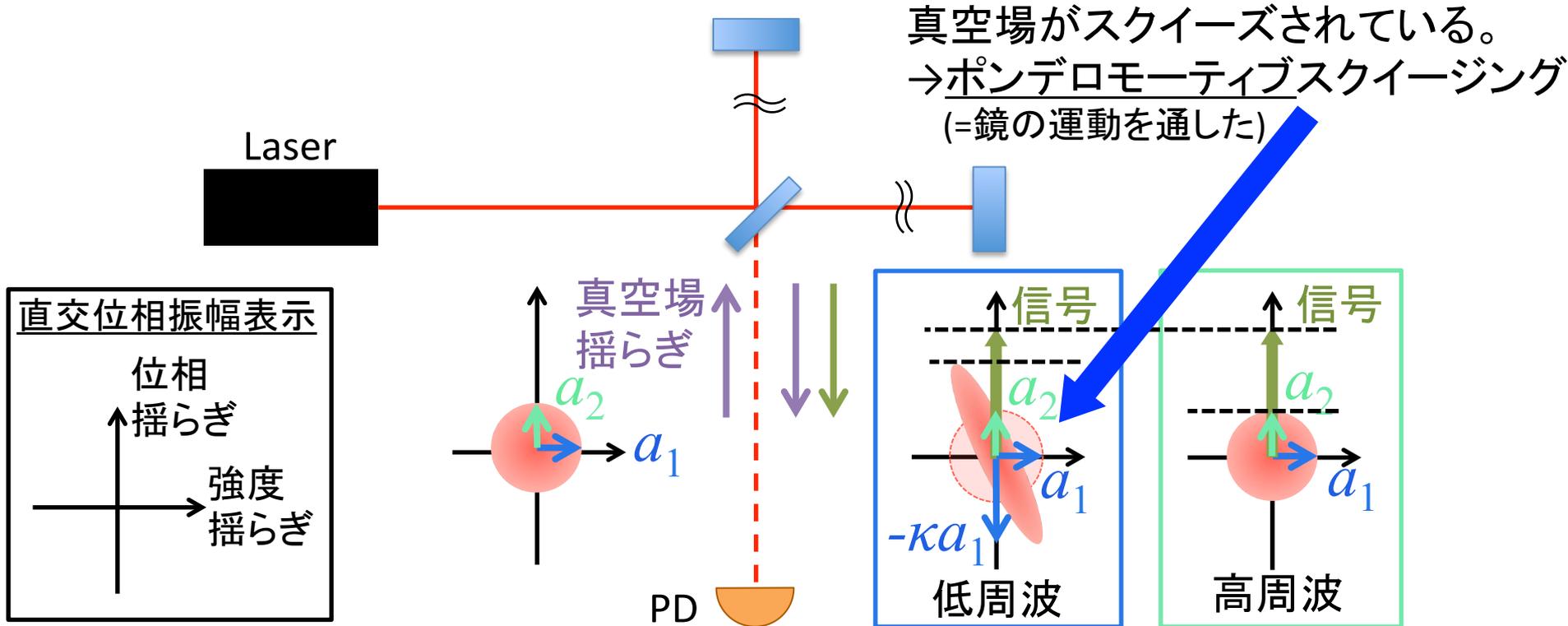
重力波検出器の量子雑音

- 重力波望遠鏡における量子雑音
= 干渉計のダークポートから入射する真空場揺らぎが原因となっている。



重力波検出器の量子雑音

- 重力波望遠鏡における量子雑音
= 干渉計のダークポートから入射する真空場揺らぎが原因となっている。



重力波検出器の量子雑音

Phase quadrature

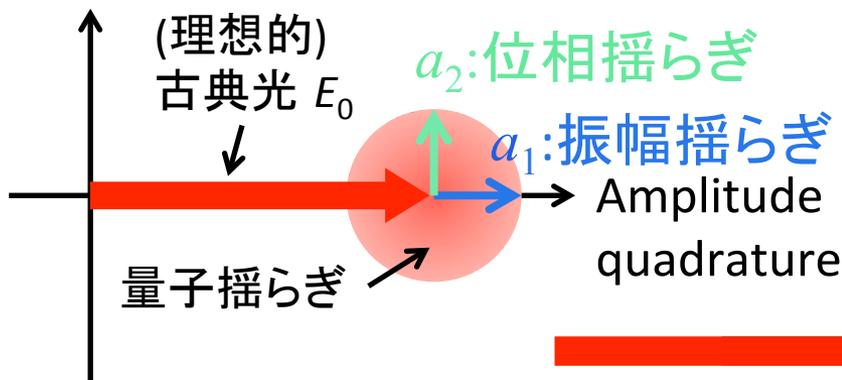
(理想的)
古典光 E_0

量子揺らぎ

a_2 : 位相揺らぎ

a_1 : 振幅揺らぎ

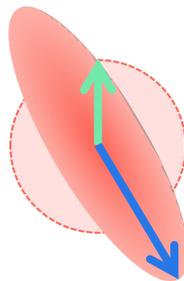
Amplitude quadrature



a_2

a_1

\equiv



$-\kappa a_1$: 輻射圧揺らぎ (~ 振幅揺らぎ)
による鏡の変位揺らぎに起因する
位相揺らぎ



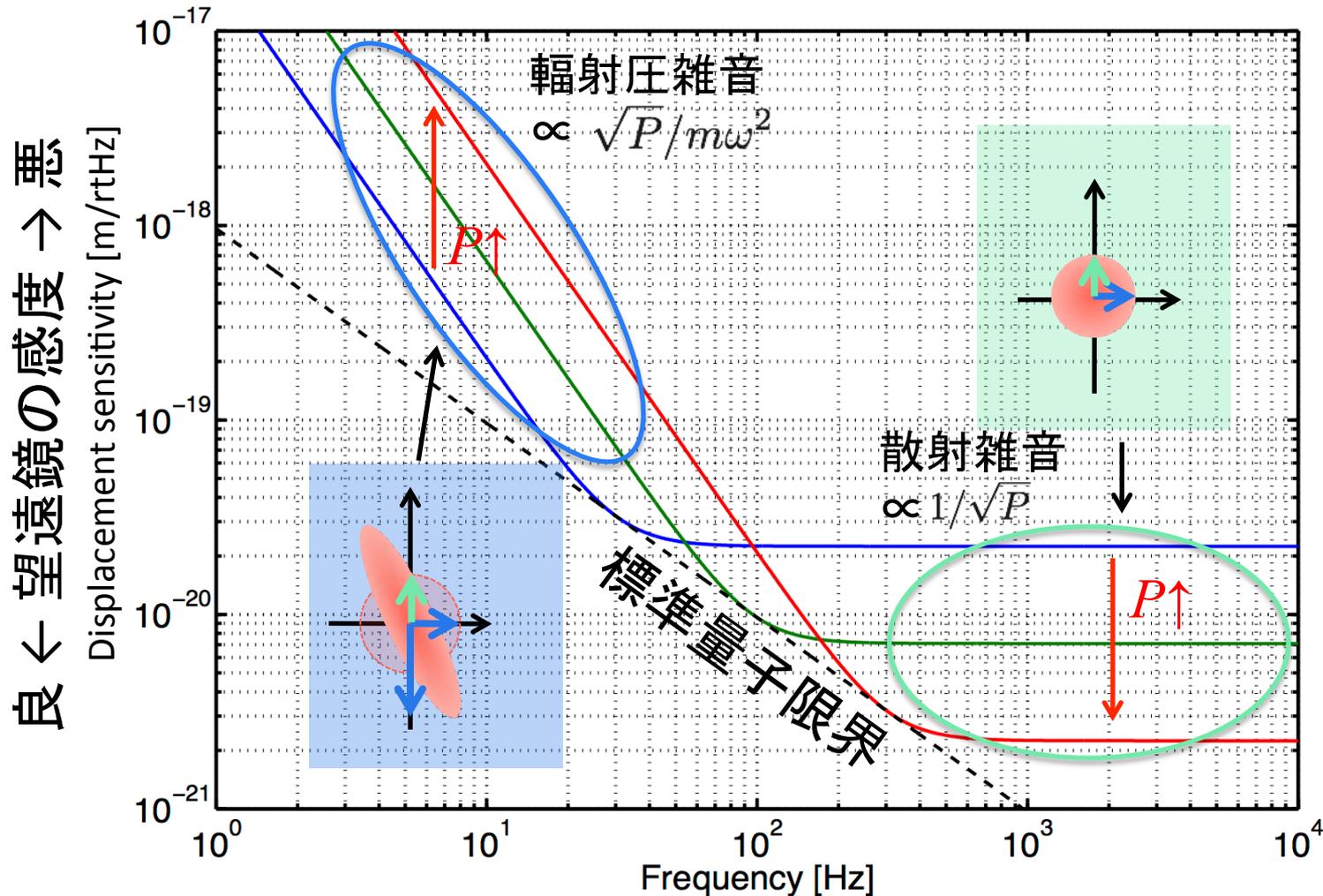
x : 変位

$\propto |E|^2$:
非線形性

$\propto P/(m\omega^2)$
 $\rightarrow E_0 a_1 / (m\omega^2)$

振幅揺らぎと
位相揺らぎが
相関を持つようになる
= ポンデロモーティブ
スキージング

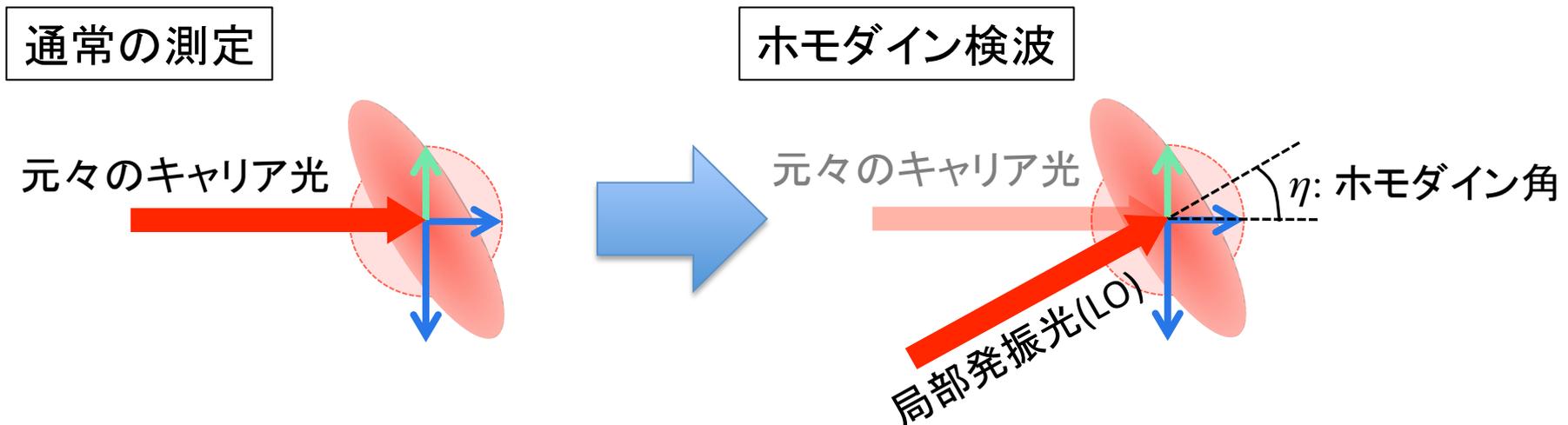
重力波検出器の量子雑音



輻射圧雑音雑音の低減

- ホモダイン検波

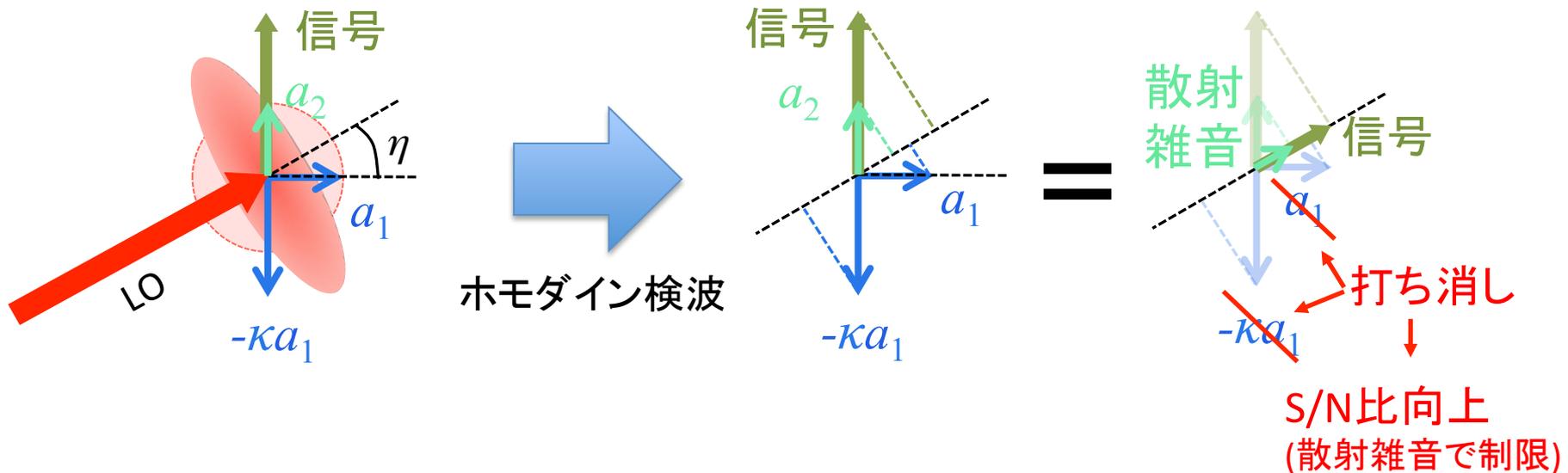
- 元々のキャリア光の代わりに新たな”キャリア光” (局部発振光 (local oscillator, LO)) を導入することで、LO方向に、振幅揺らぎと位相揺らぎの線形結合成分を測定する。



輻射圧雑音雑音の低減

- 輻射圧雑音の低減

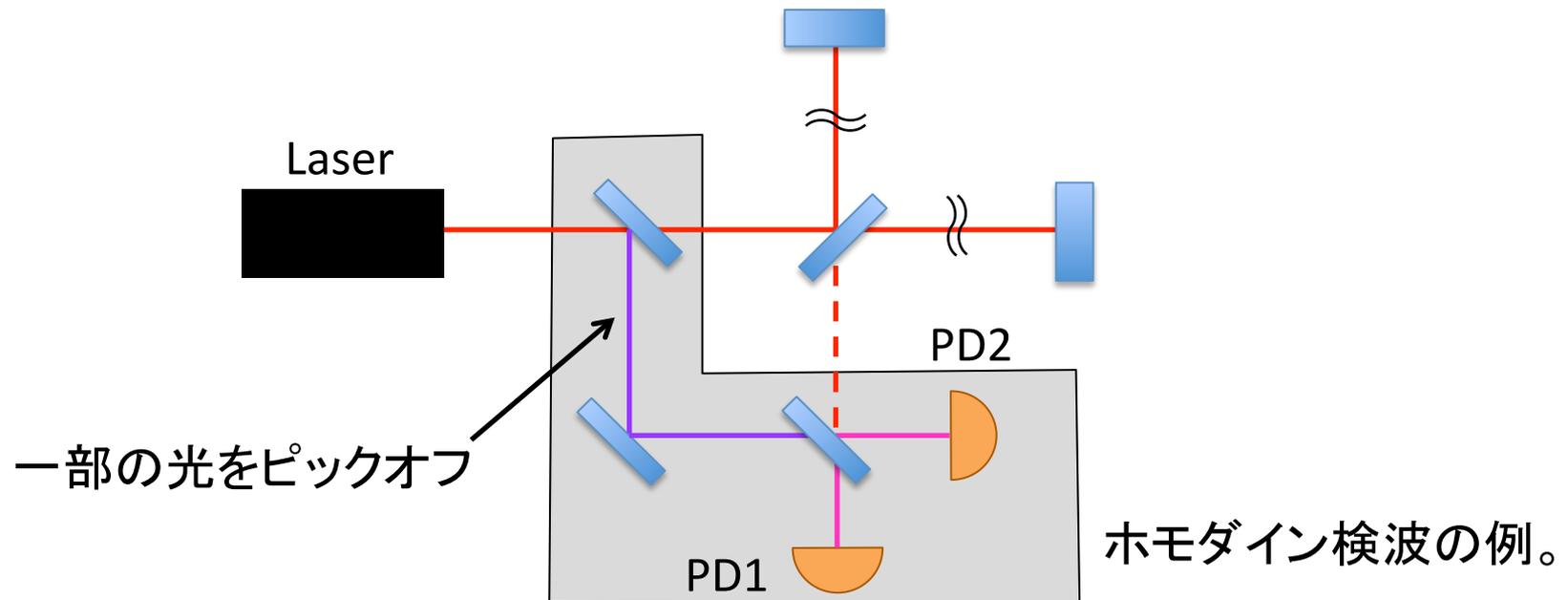
- ホモダイン検波を用いると、以下のように元々の強度揺らぎ (a_1) と、鏡の運動を通して生じた位相揺らぎ ($-ka_1$) が打ち消す方向の測定ができる



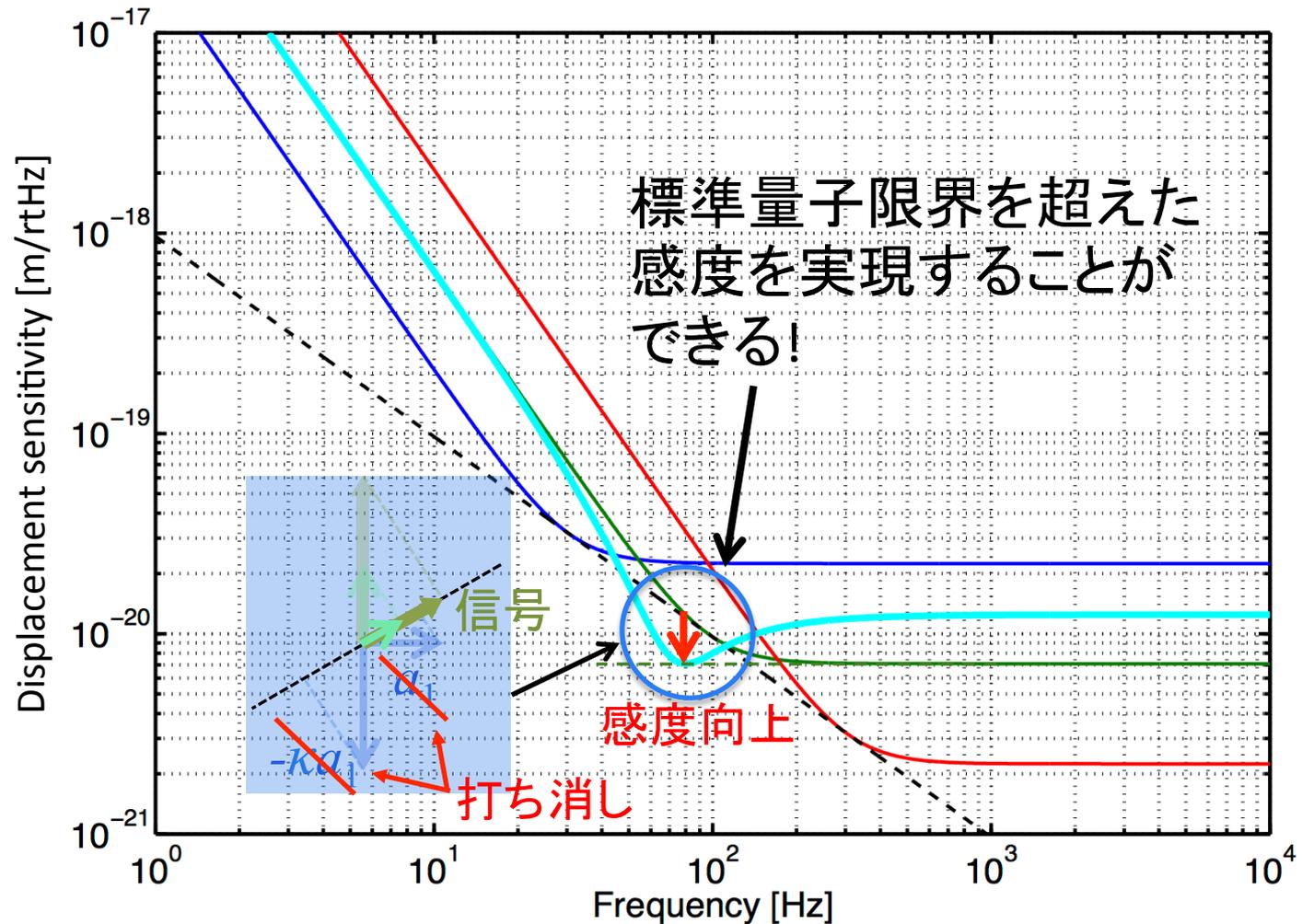
重力波検出器の量子雑音の低減

- ホモダイン検波

- 重力波検出器は、通常は位相信号しか読み出せないが、ホモダイン検波を用いると、位相信号と振幅信号の線形結合を読み出せるようになる。

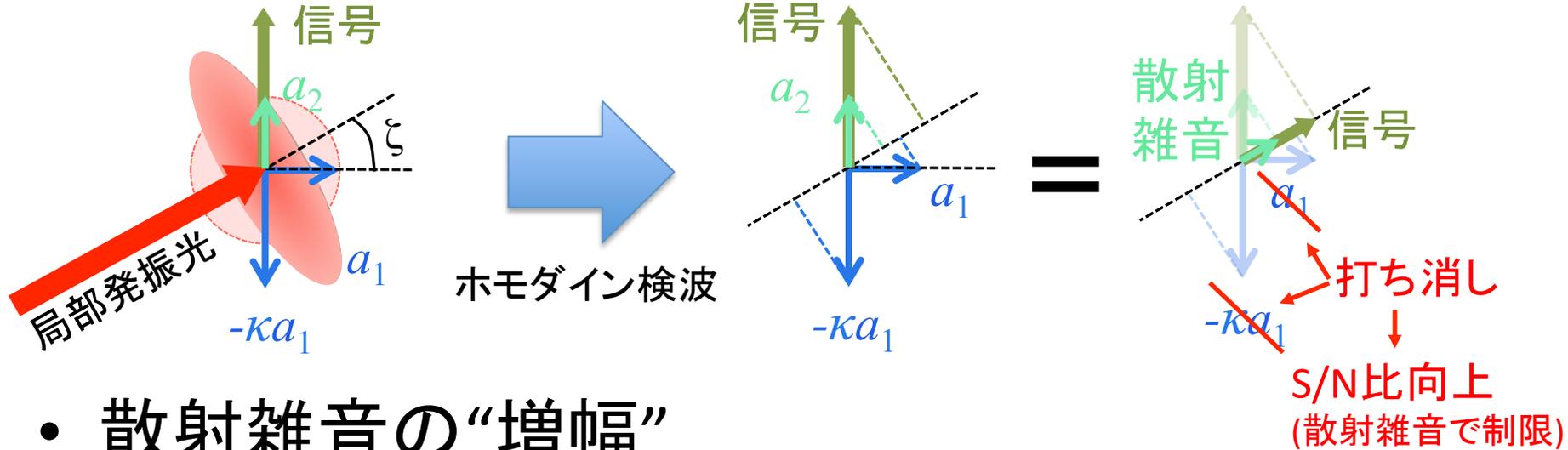


輻射圧雑音雑音の低減

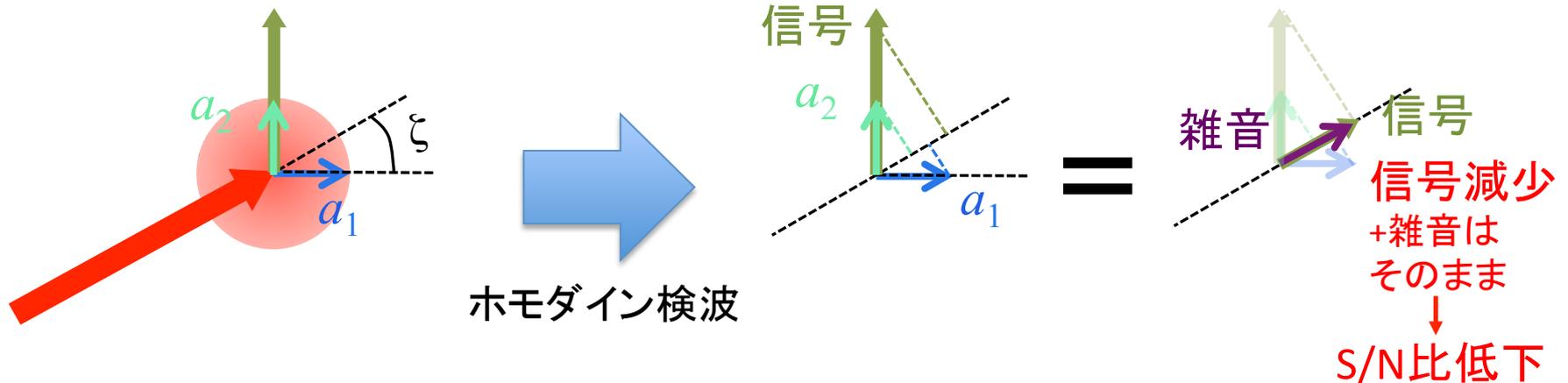


輻射圧雑音雑音の低減

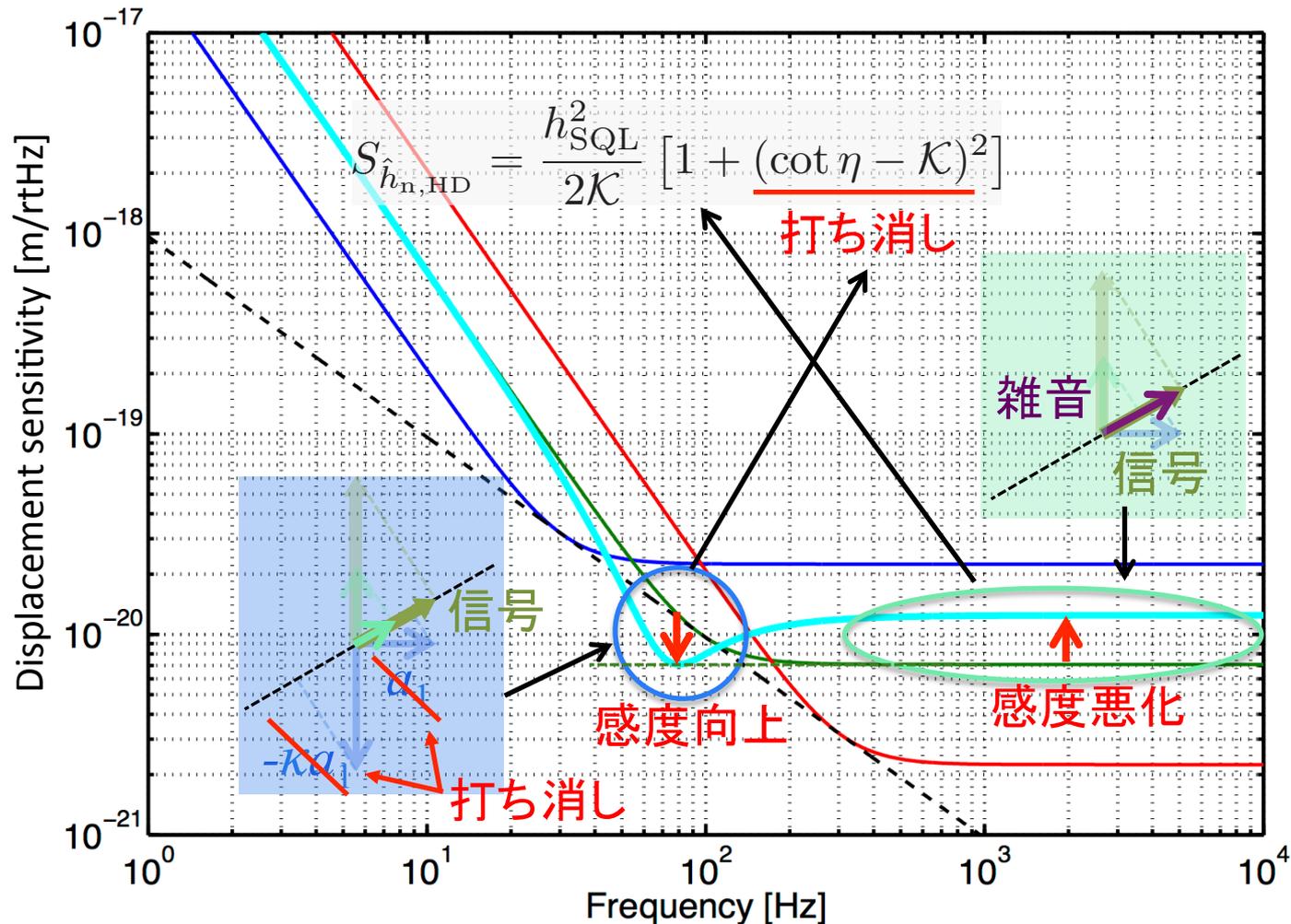
• 輻射圧雑音の低減



• 散射雑音の“増幅”

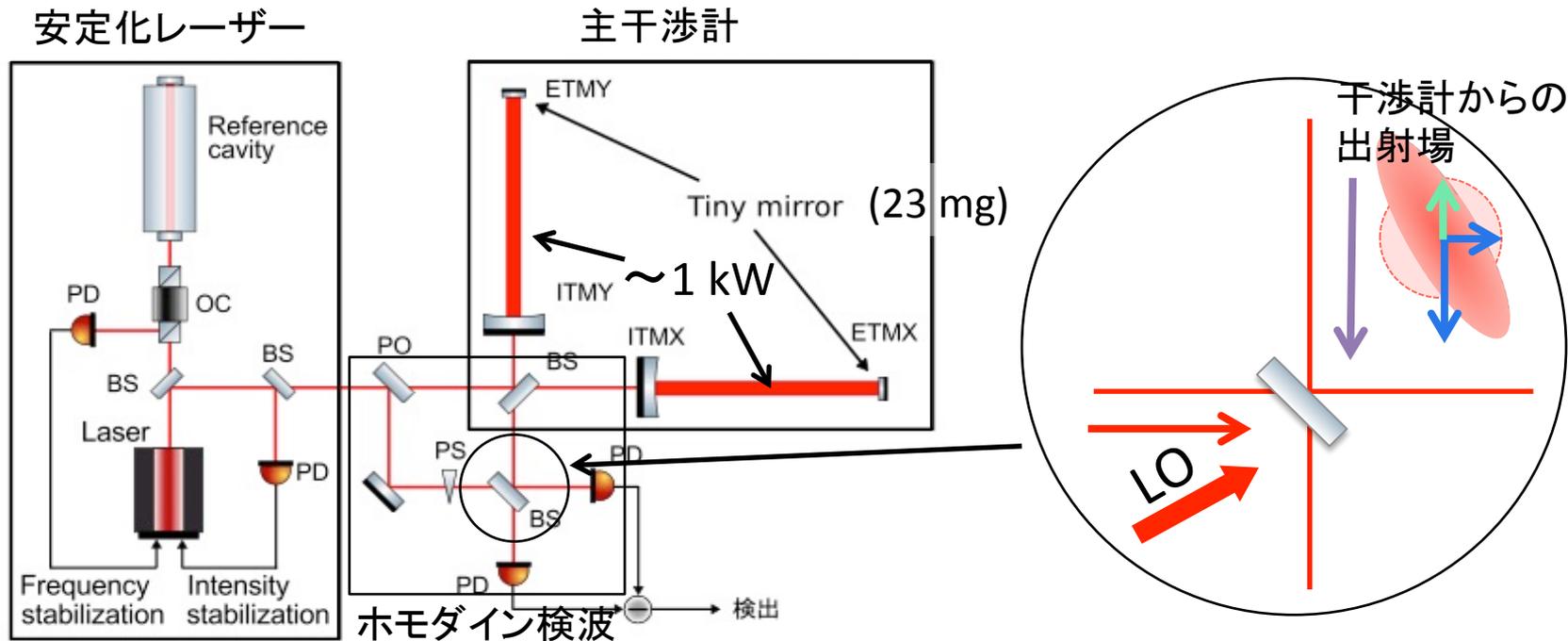


輻射圧雑音雑音の低減

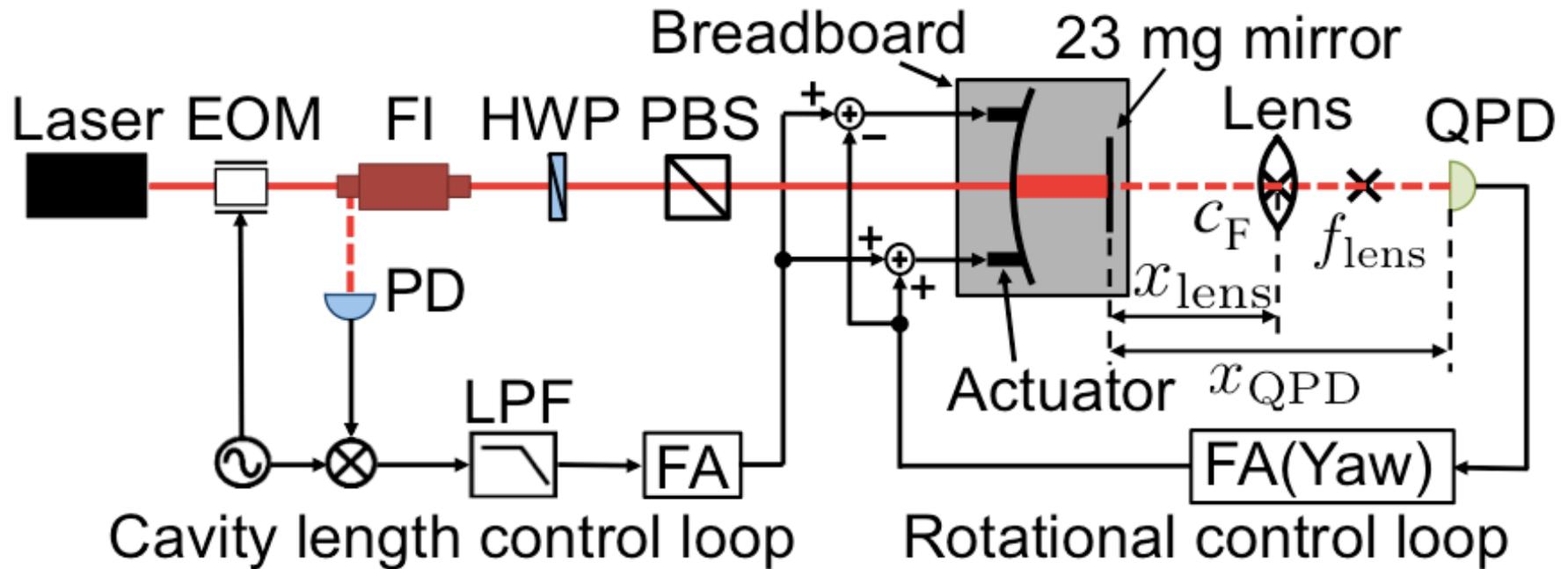


輻射圧雑音観測のための干渉計の設計

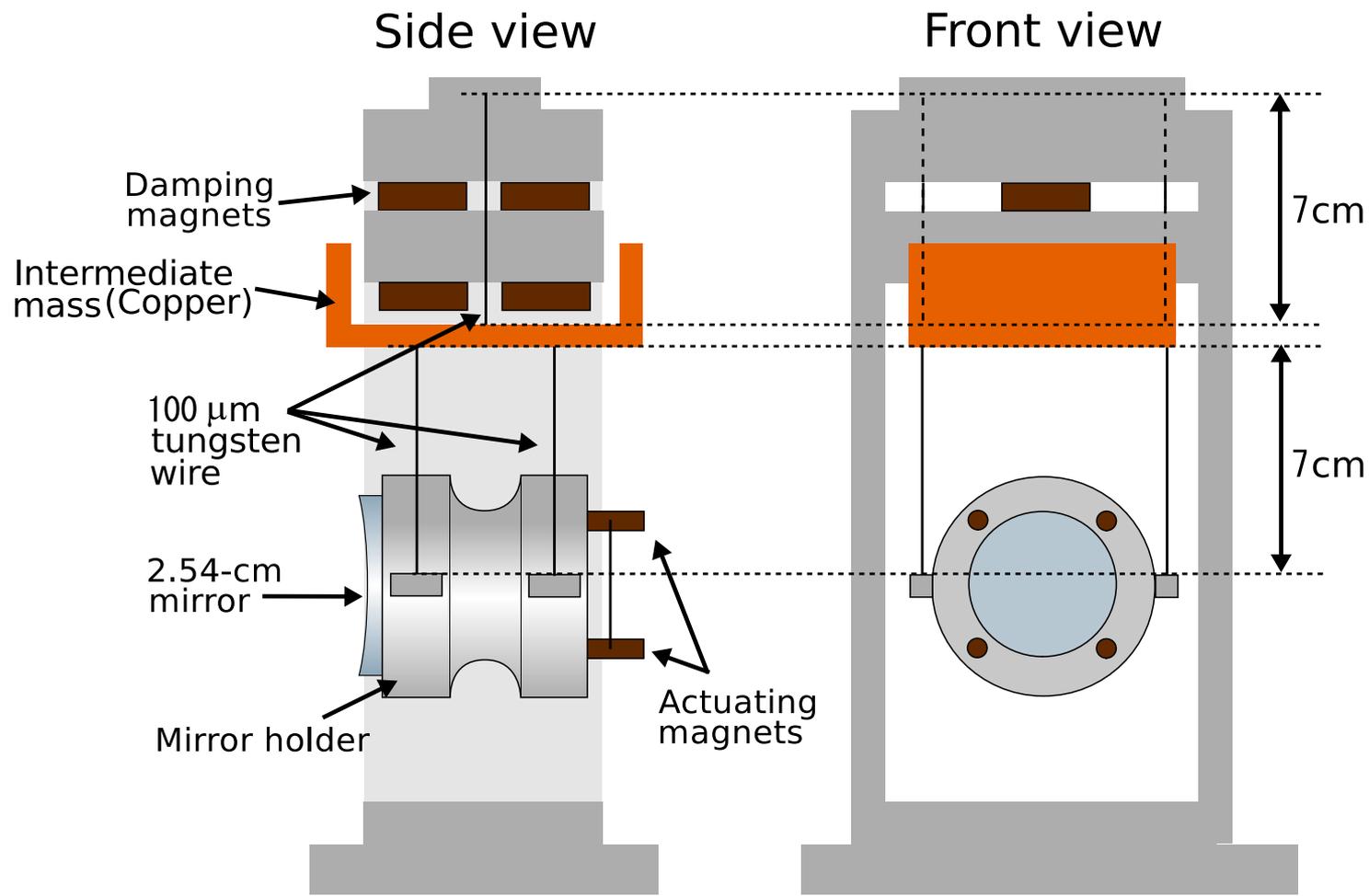
- 基本的には、KAGRAの光学設計と類似したFabry-Pérot Michelson干渉計を用いる。
- 本研究では、干渉計の腕共振器のエンド鏡に23 mgの軽量鏡を用いて輻射圧雑音を増幅していることが特長。(KAGRAの輻射圧雑音より約 10^4 倍大きくなる。)



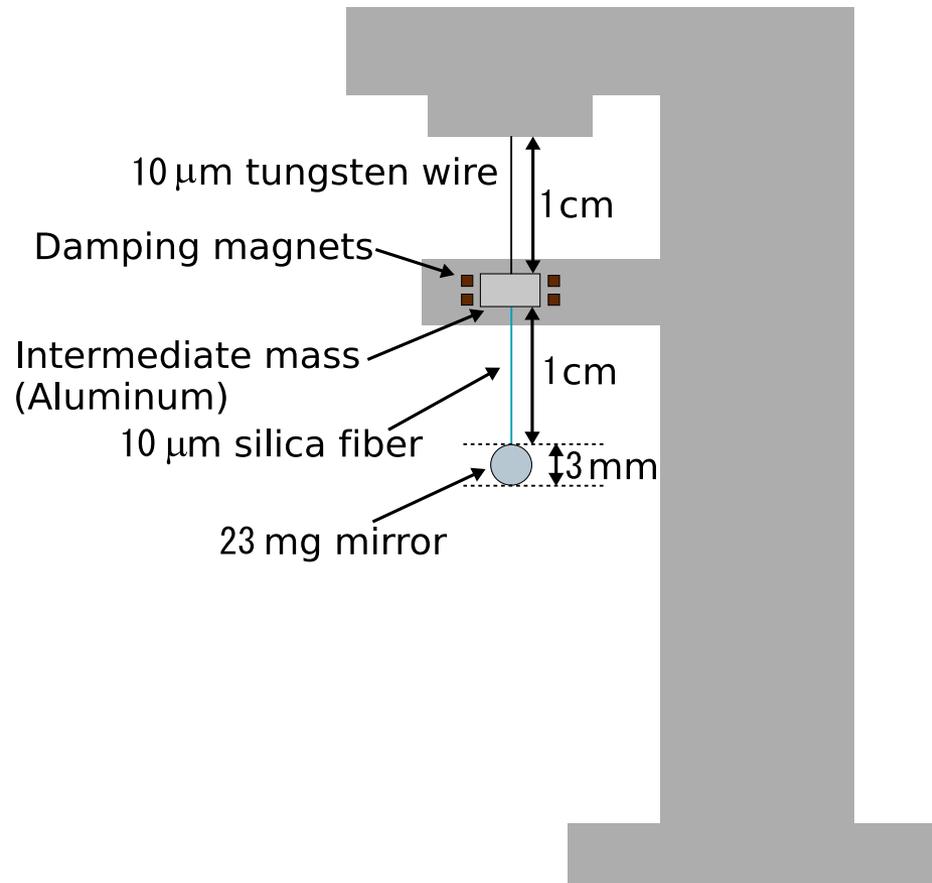
回転方向不安定性に関する実験系



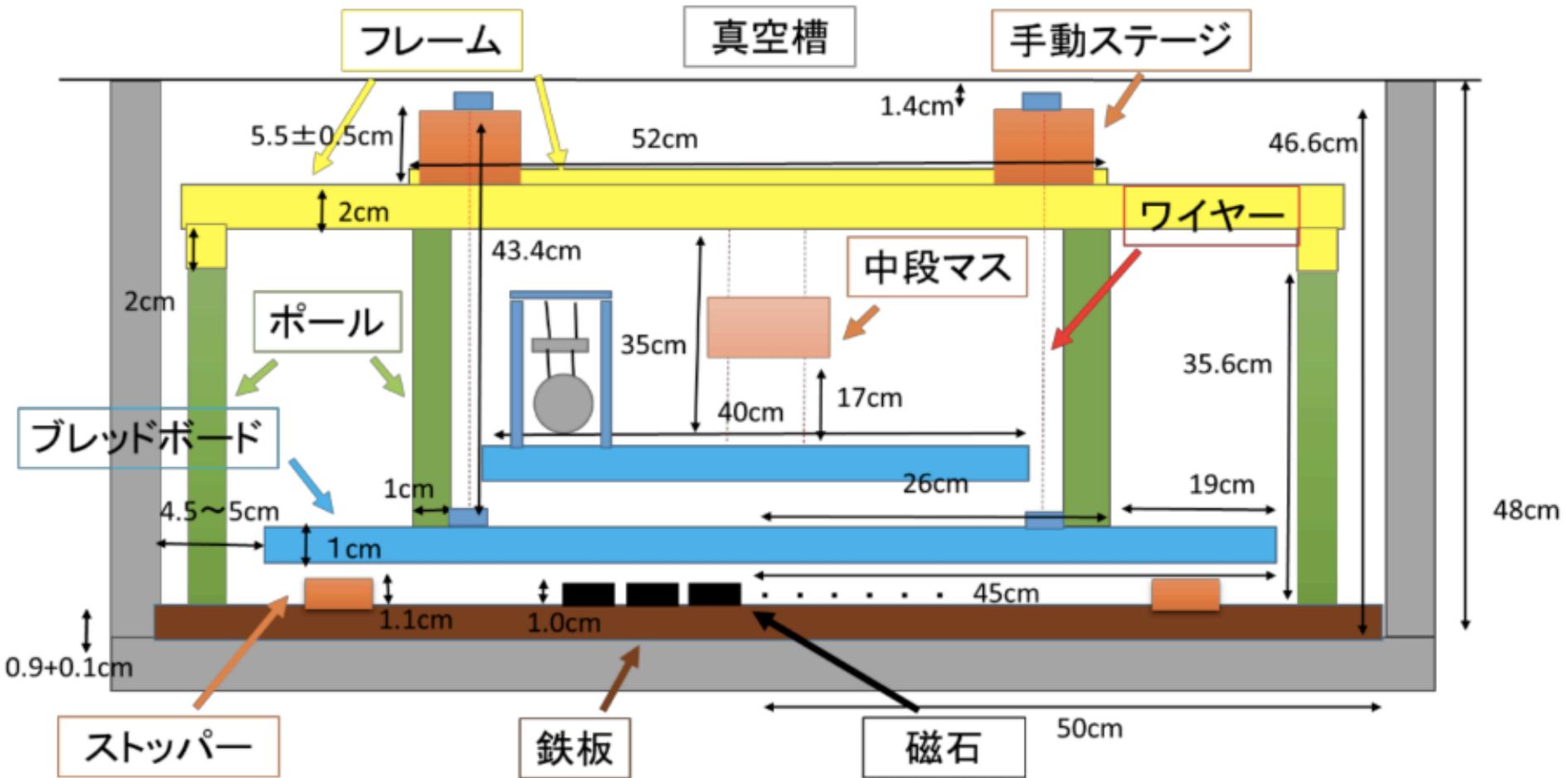
インプット鏡懸架系



エンド鏡懸架系



防振系



周波数安定化

- 干渉計の設計感度を達成するためには、レーザー光源の周波数を安定化する必要がある。
- レーザー結晶より安定な参照共振器に対してレーザー周波数を追従させることで安定化する。
- 制御には、
 - レーザー光源のピエゾ素子 (PZT) ← 1 Hz – 10kHz
 - 電気光学変調器 (EOM) ← 10k – 数100k Hz
 - レーザー光源の温度制御 (Thermal control) ← 1 Hz
をアクチュエータとして用いる。 以下

参照共振器の特性

スペーサー

- 材質: 溶融石英
- 共振器長: 27 cm
- 直径: 7 cm

鏡

- 材質: 溶融石英
- 厚さ: 6.5 mm
- 直径: 20 mm
- フィネス: 30000 (実測)
- 曲率半径: (フロント) ∞ 、(エンド) 1 m

その他

- 圧力: 1 Pa以下 (現在は大気圧)
- 温度: 300 K
- 防振: 共振周波数1 Hzの振り子 (現在は定盤に直接設置)

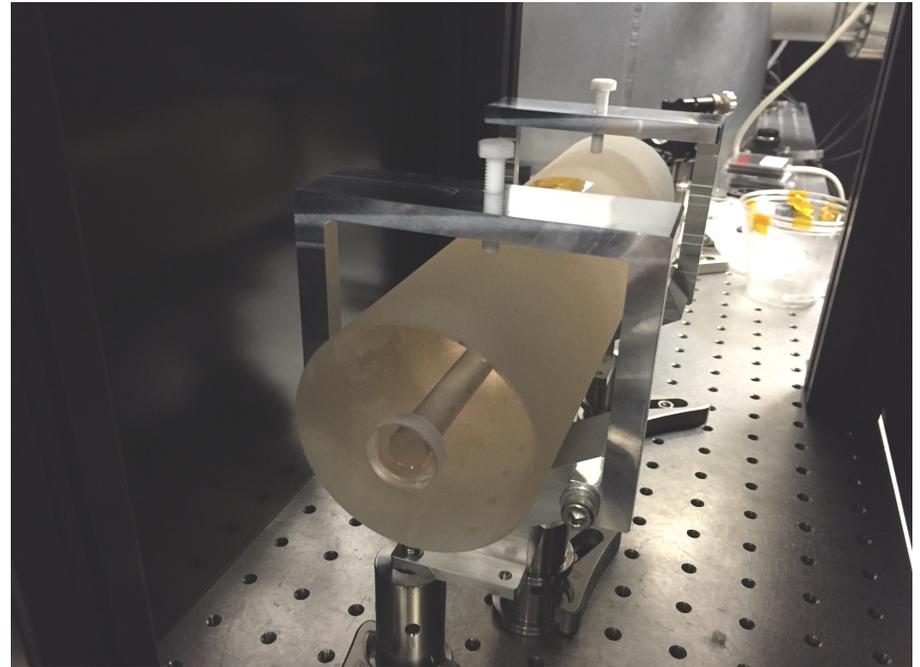
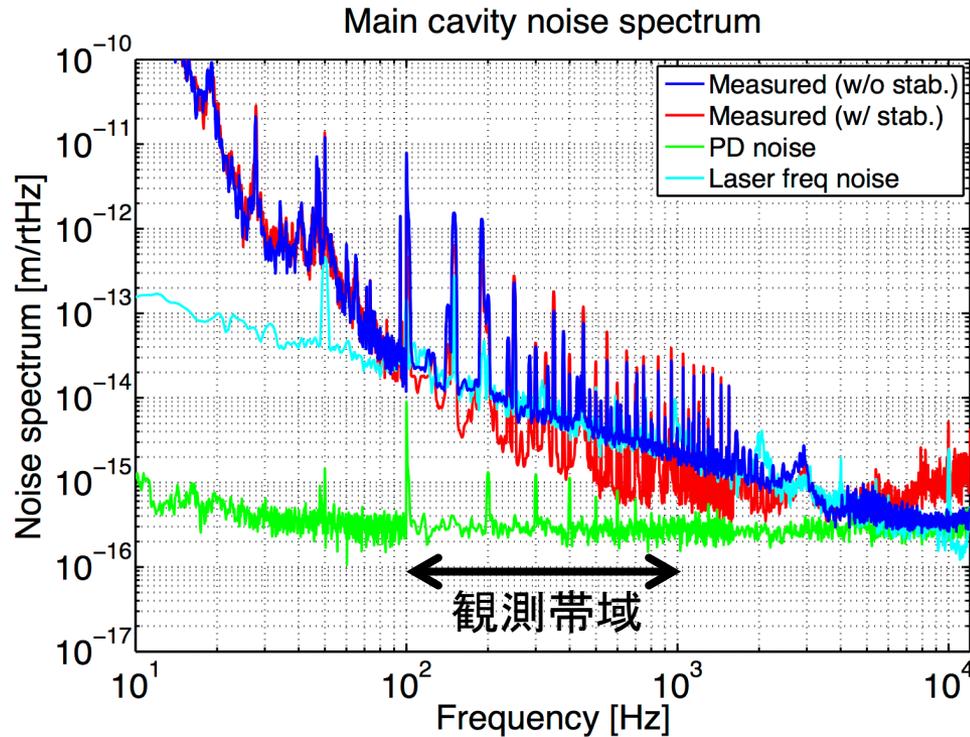


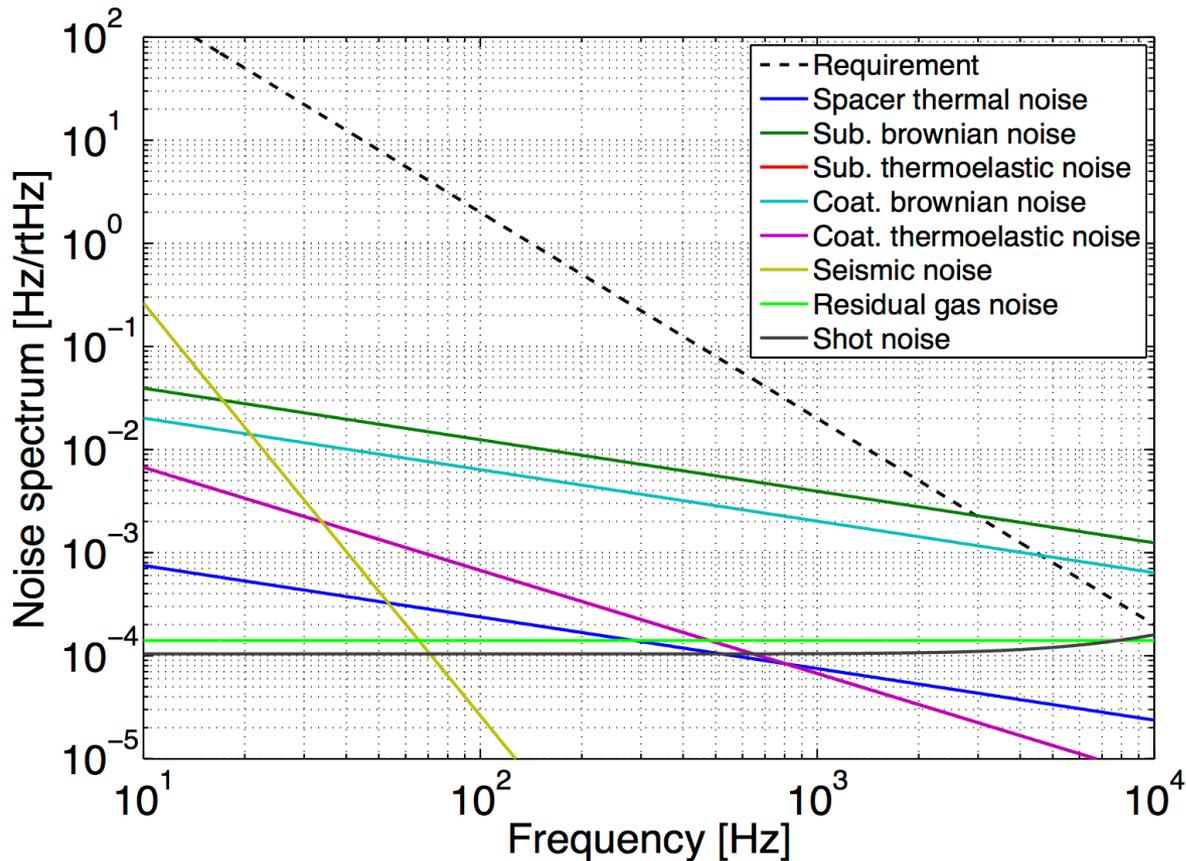
図: 参照共振器の写真。

軽量鏡を持つ共振器の感度



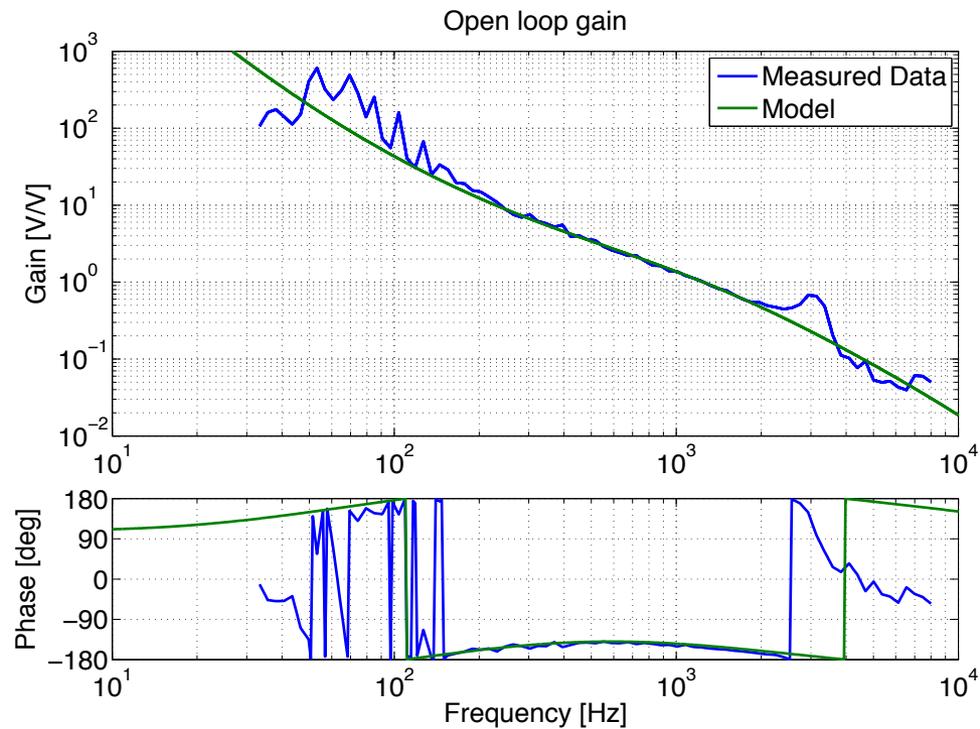
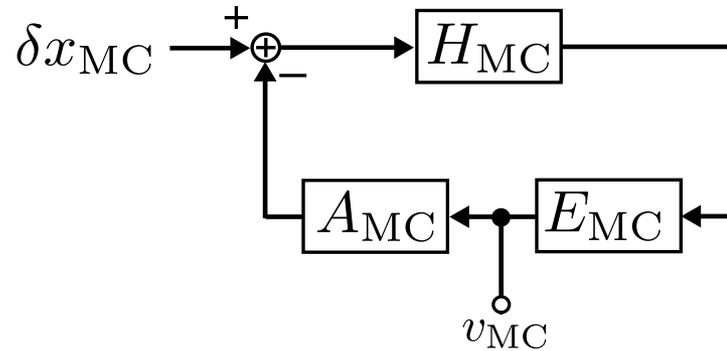
- これまでは、周波数雑音で制限されていたが、周波数安定化を導入することで感度が向上した。
- しかし、周波数安定度の (制御内) 評価によると、感度はさらに改善しているはずである。

参照共振器の感度

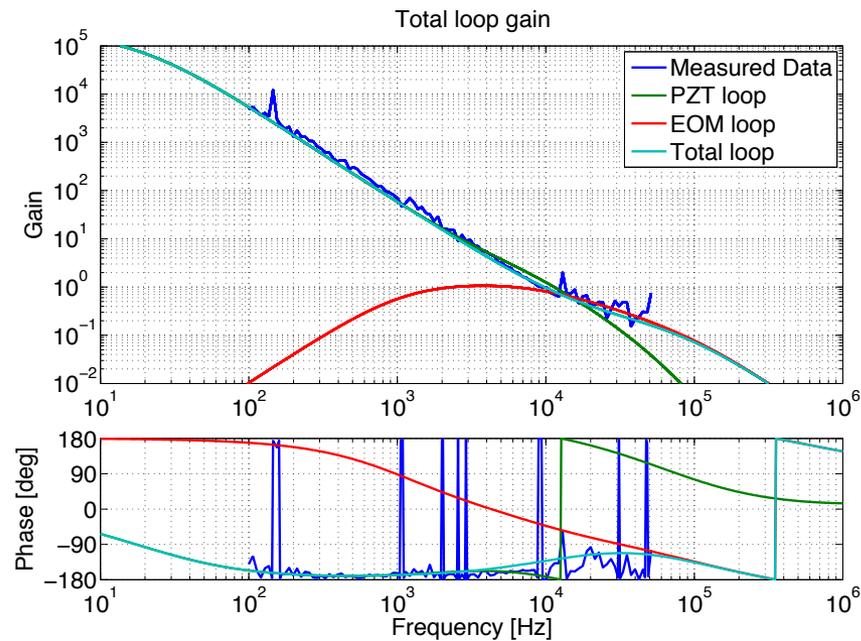
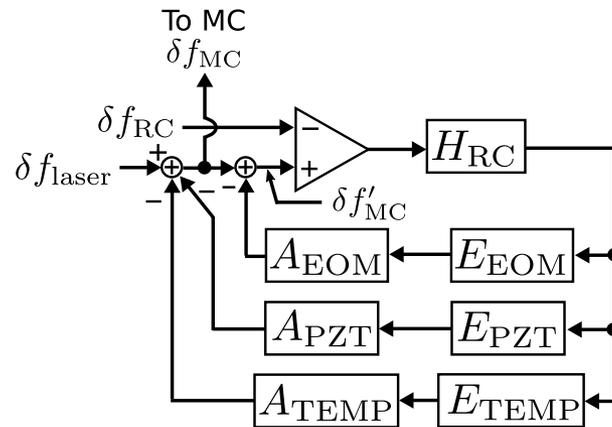


- 参照共振器は100—1000 Hzで要求値を満たす。

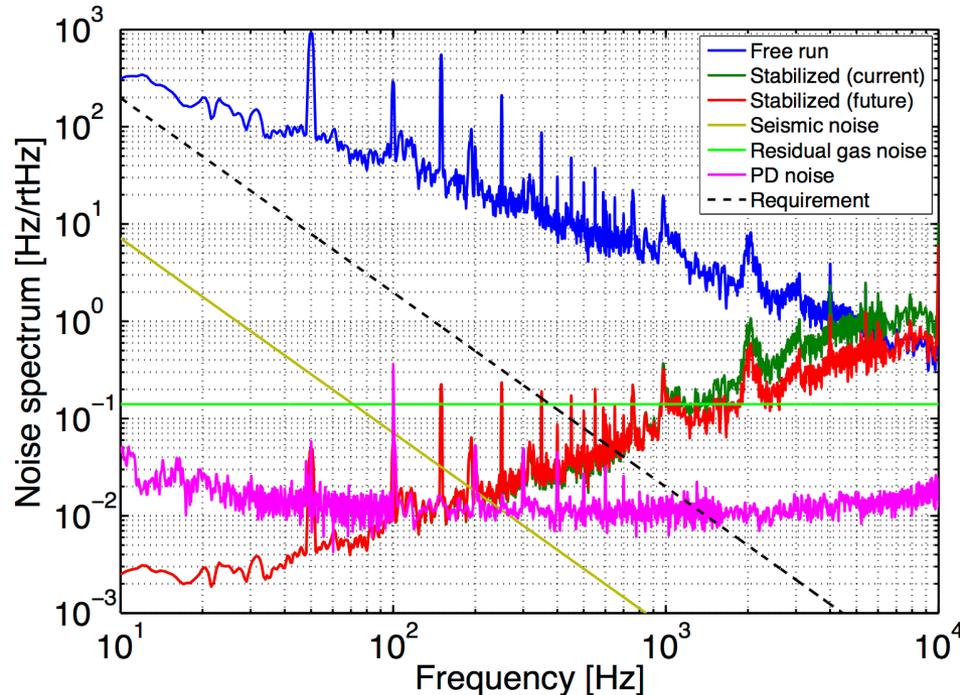
プロトタイプ共振器のループゲイン



参照共振器のループゲイン



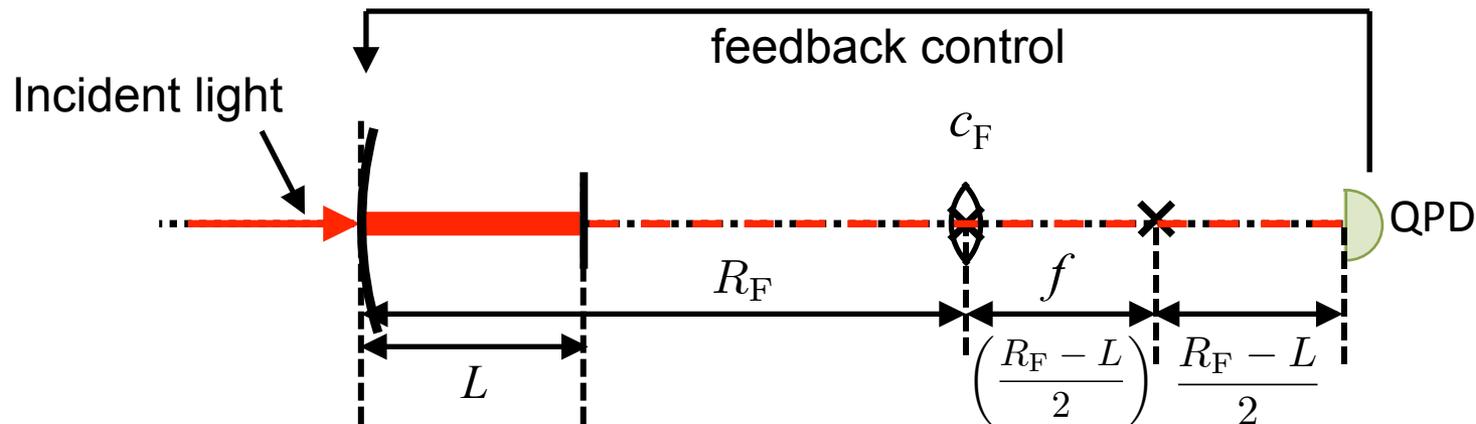
参照共振器の感度



- レーザー光源の周波数揺らぎと構築した制御系のゲインから、周波数安定度を推定した。
- 100—600 Hzの間では、十分な制御ゲインが得られている。
- 600—1000 Hzの間で要求値を達成するには、制御ゲインを約5倍にする必要がある。(先行研究から10倍程度にはできることが分かっている。)

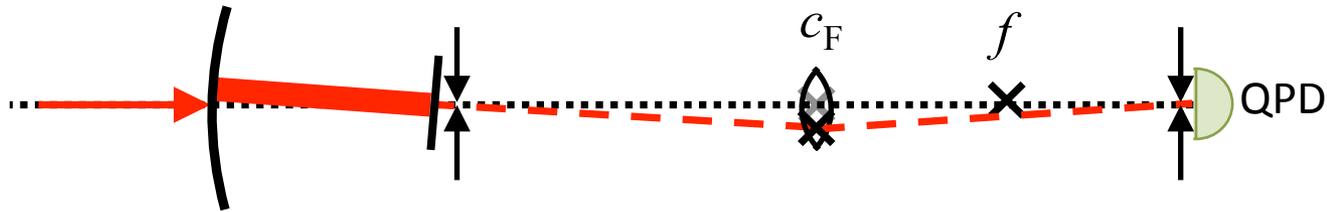
エンド鏡上でのビームスポットずれの測定

- エンド鏡上でのビームスポットずれの測定方法
 - レンズとQPDを以下の幾何学的条件を満たすように設置して、透過光の位置をQPDで測定すれば良い。



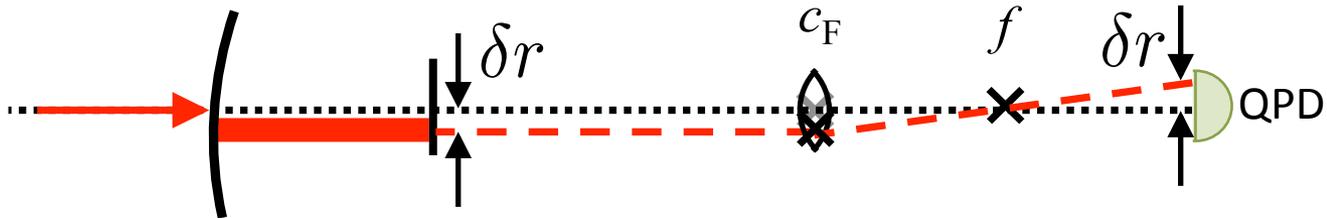
エンド鏡上でのビームスポットずれの測定

Case1. エンド鏡上のビームのずれない共振器軸ずれ (傾き)



→ QPDは信号を出力しない

Case 2. エンド鏡上のビームがずれる共振器軸ずれ (平行移動)



→ QPD はエンド鏡上でのビームスポットずれに比例する信号を出力する。

(共振器軸の(微小)ずれは、これらの2つのずれの線形結合ですべて表すことができる)