

重力波検出器KAGRAのための 量子雑音低減法の開発

宇宙基礎物理学研究部門 重力波観測研究施設
長野 晃士

本日の流れ

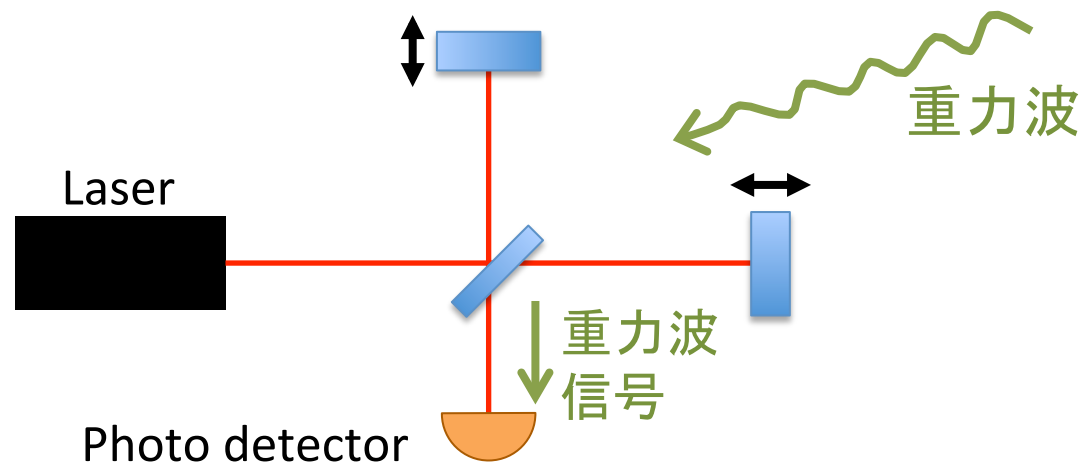
1. 重力波検出器と量子雑音
2. 量子雑音観測のための実験設計
3. 実験方法と結果
4. まとめ

重力波検出器と量子雑音

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

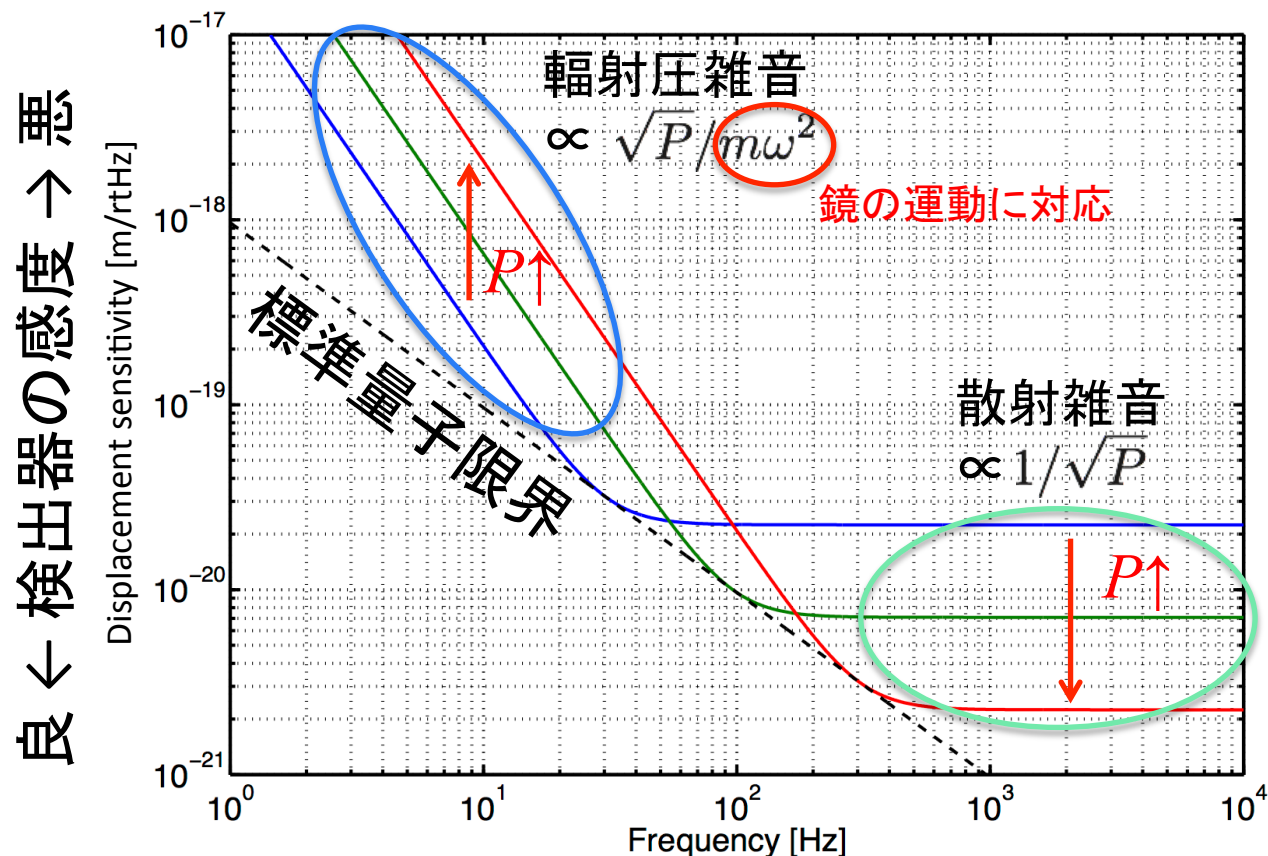
大型低温重力波望遠鏡 KAGRA

- 重力波：時空の歪みが波として伝播する現象
- 重力波直接観測のため、重力波検出器KAGRAの建設が進んでいる。
- 現在の重力波検出器は、Michelson干渉計を基本としたものが主流となっている。
- KAGRAの目標感度は、主にレーザー光の量子性によって生じる量子雑音によって制限されている。



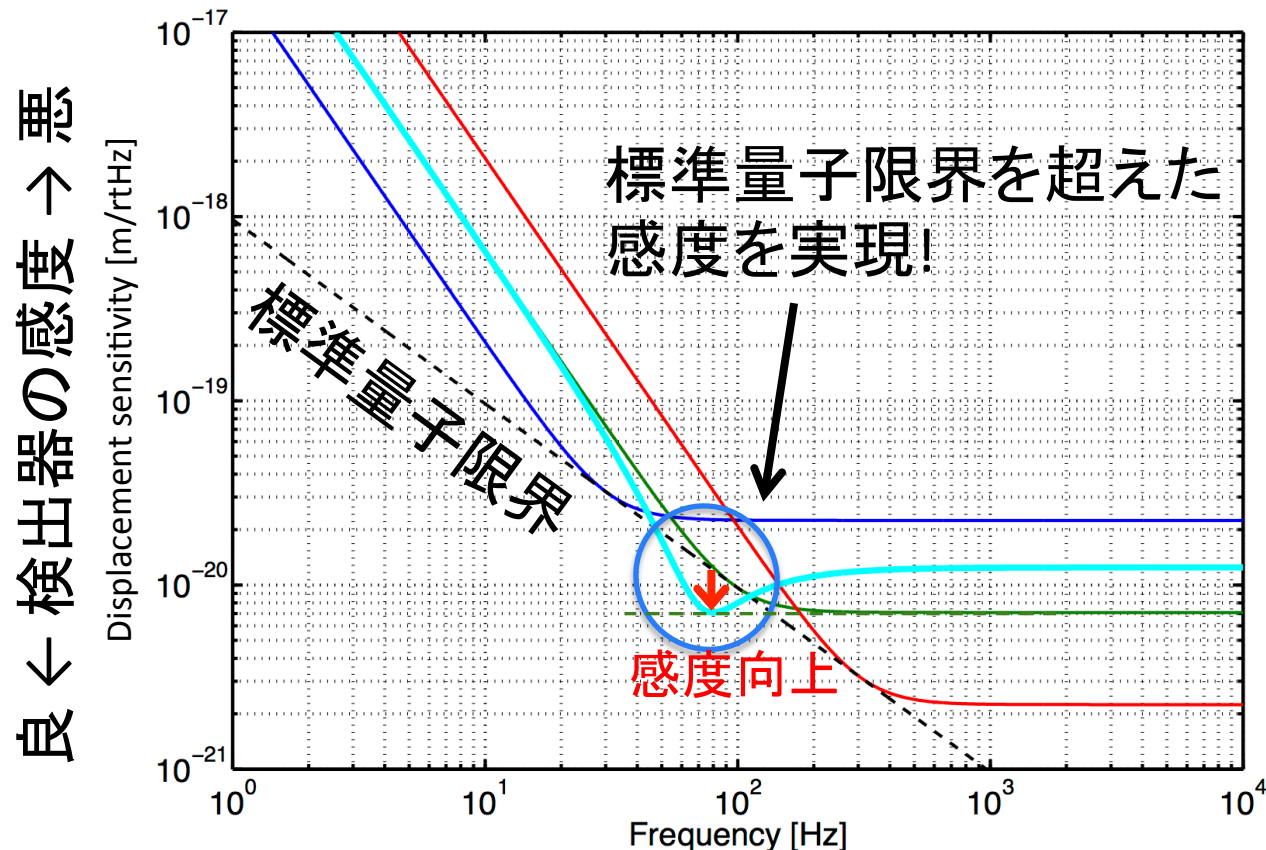
重力波検出器の量子雑音

- 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

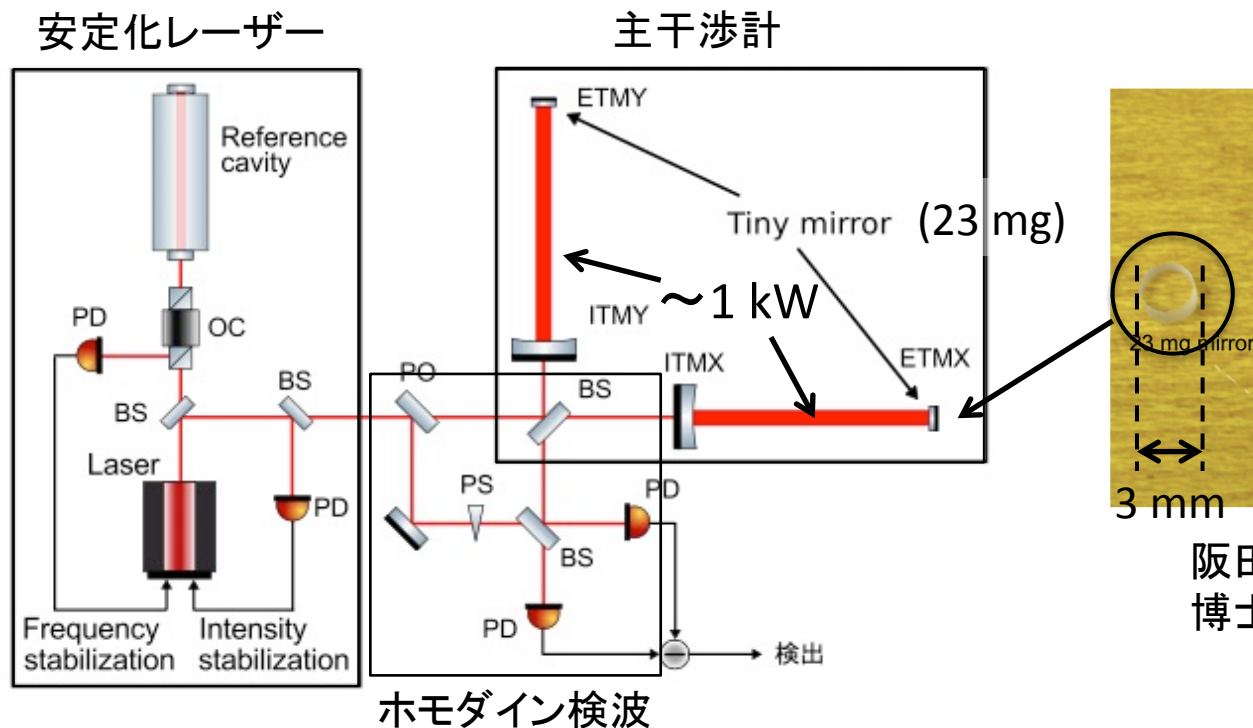


量子雑音観測のための実験設計

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

輻射圧雑音観測のための干渉計の設計

- 23 mgの軽量鏡 → 輻射圧雑音を増幅
→ 輻射圧雑音がKAGRAの約 10^4 倍



阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。

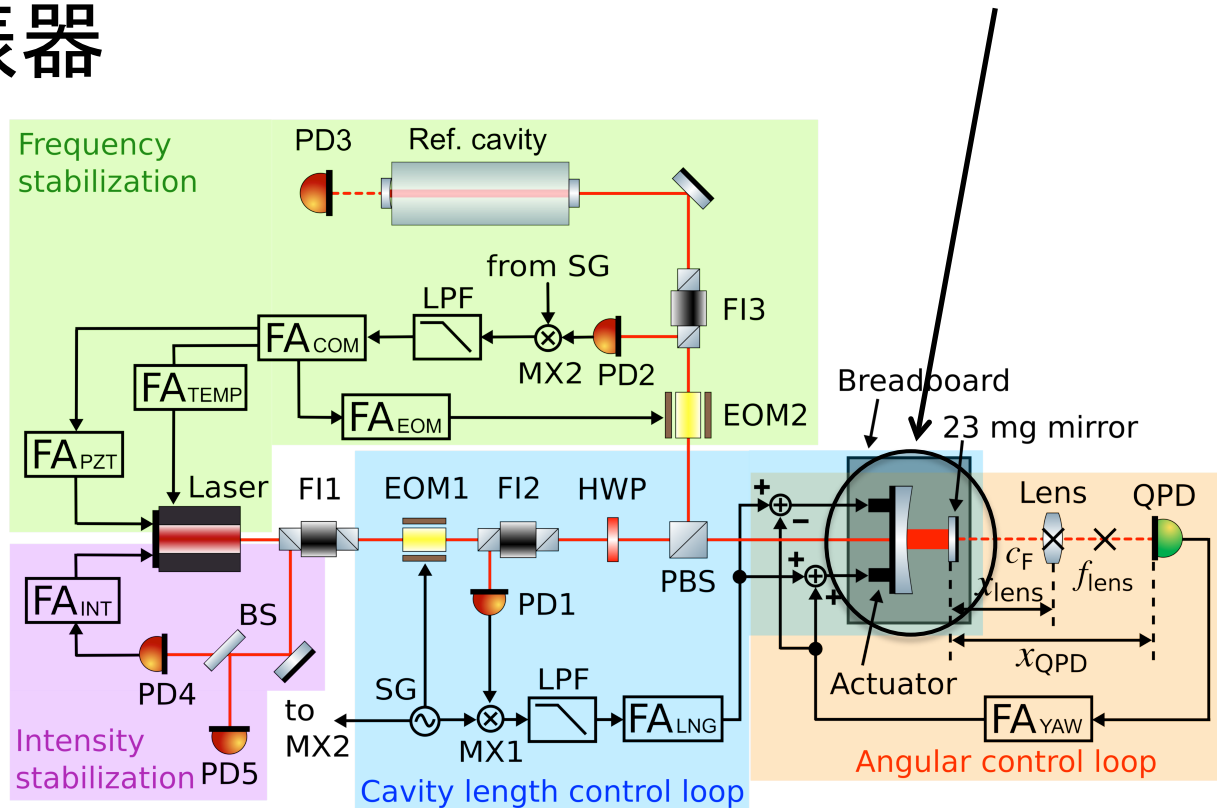
実験方法と結果

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

実験セットアップ

実験装置

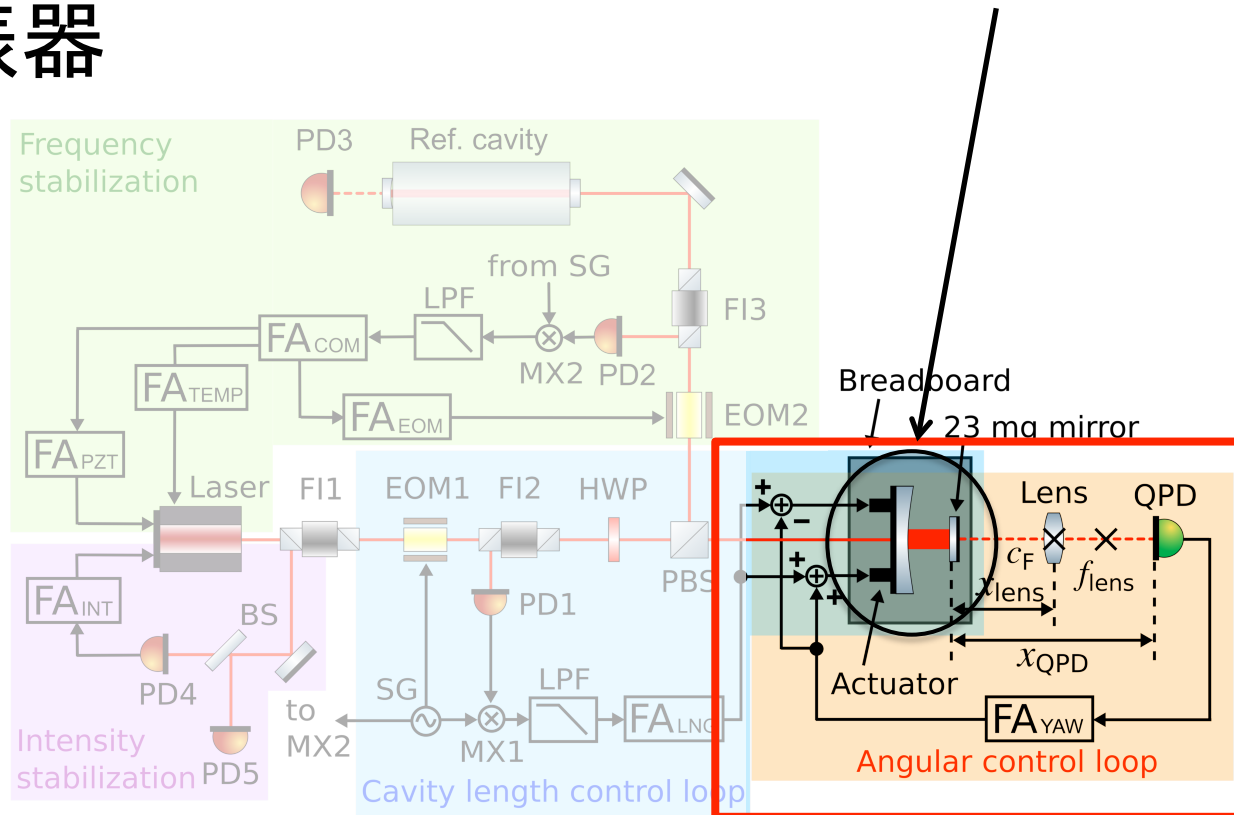
- 23 mg の軽量懸架鏡を持つ1つのFabry-Pérot 共振器



実験セットアップ

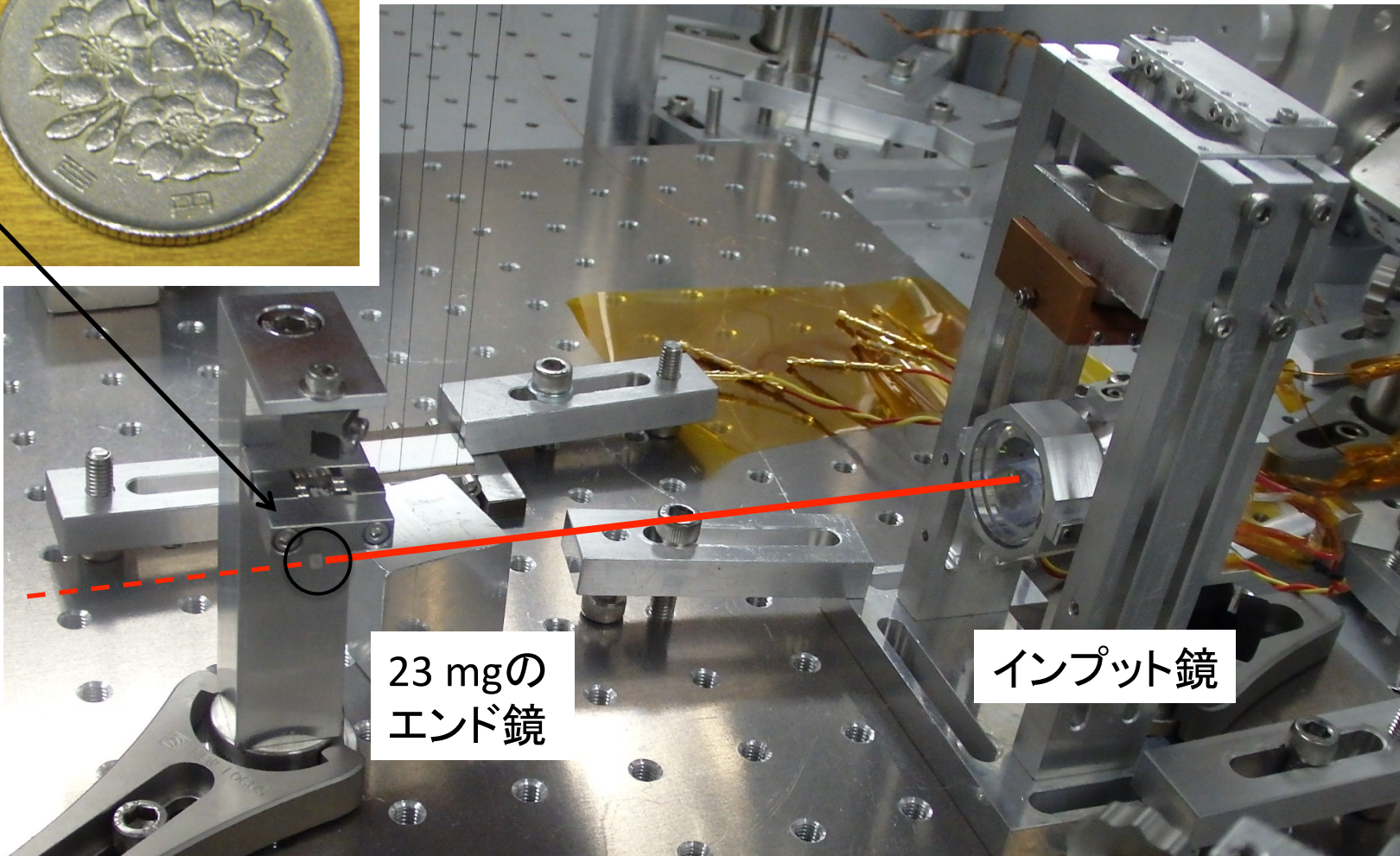
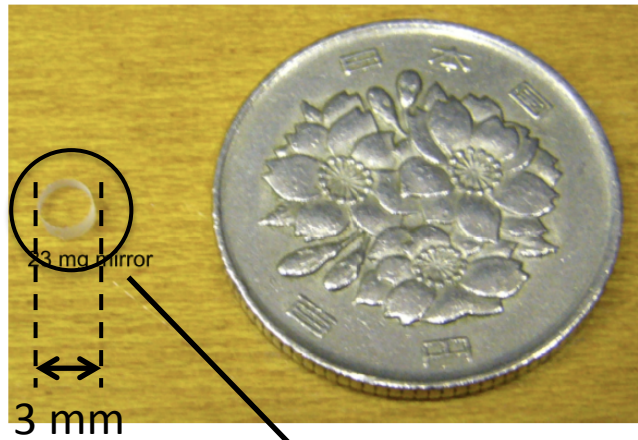
実験装置

- 23 mg の軽量懸架鏡を持つ1つのFabry-Pérot 共振器



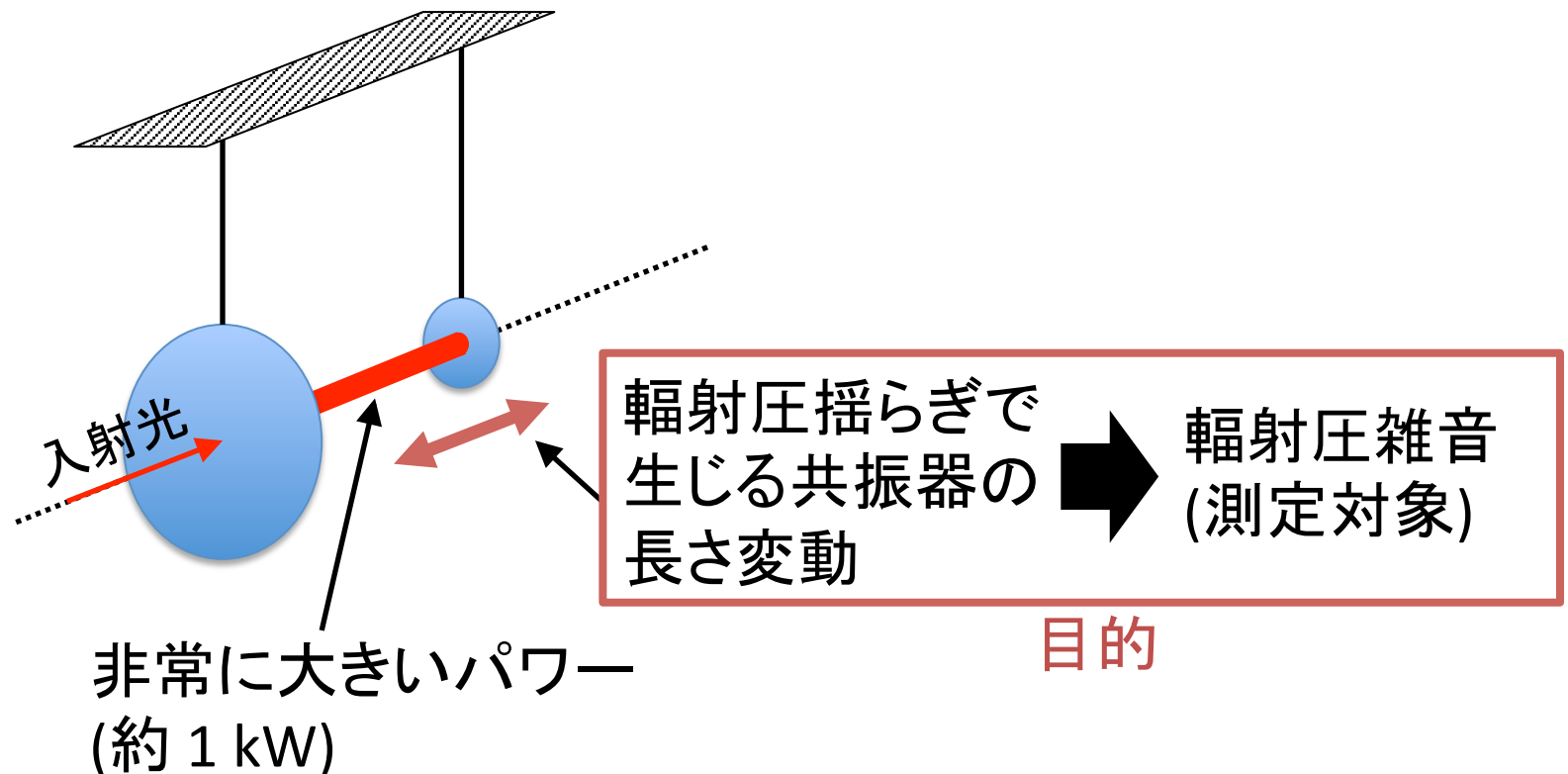
軽量鏡を持つ共振器

阪田紫帆里 お茶の水女子大学
博士論文 (2008) より。



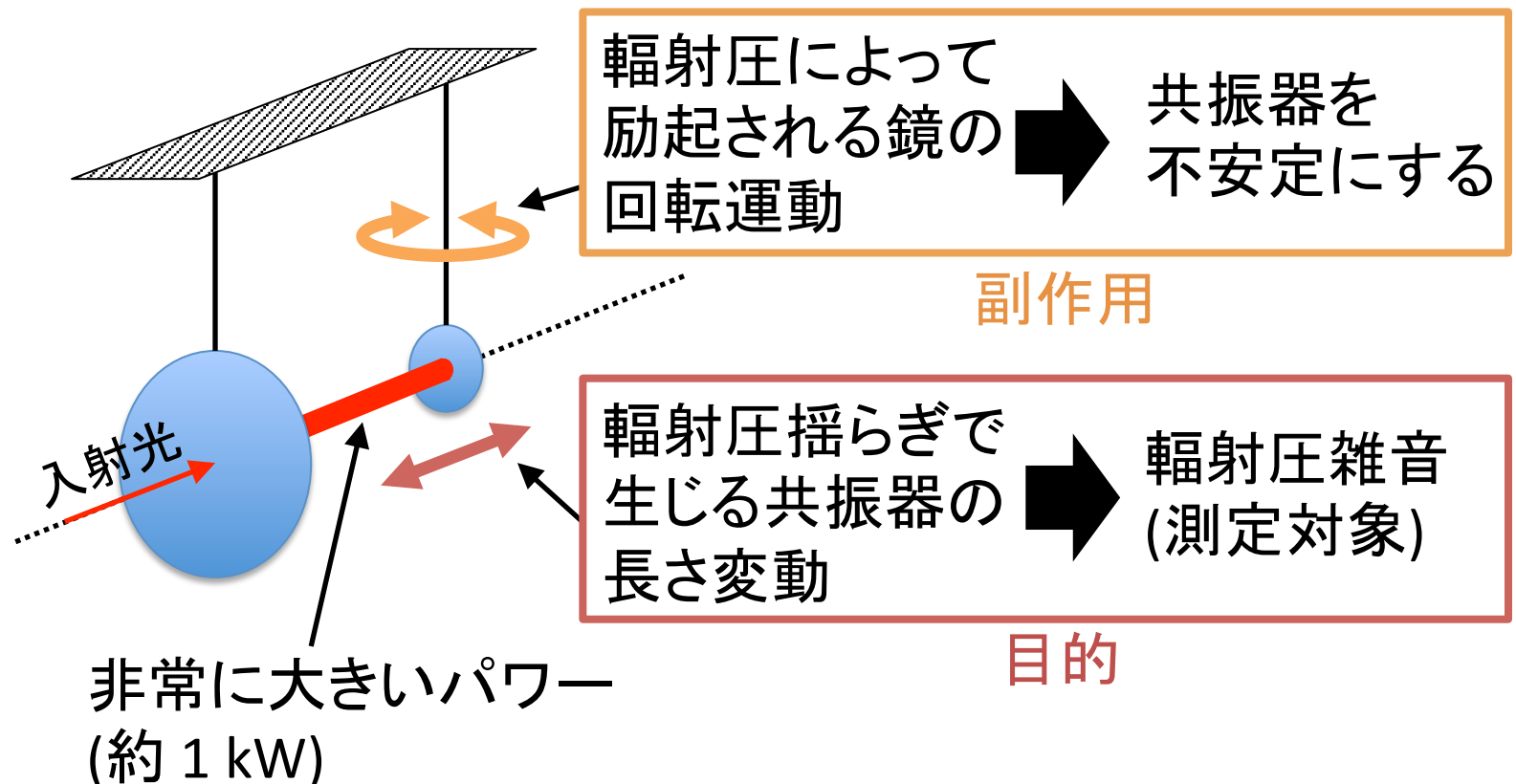
実験

- 目標：輻射圧雑音に制限された測定
=軽量鏡の運動を輻射圧揺らぎが決める状況



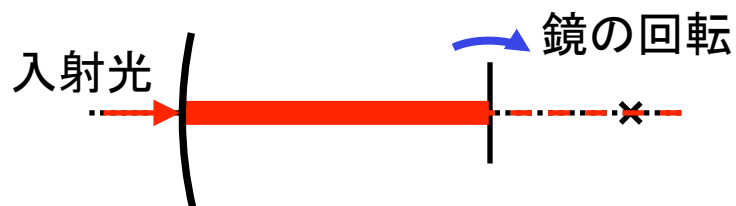
実験

- 目標：輻射圧雑音に制限された測定
=軽量鏡の運動を輻射圧揺らぎが決める状況

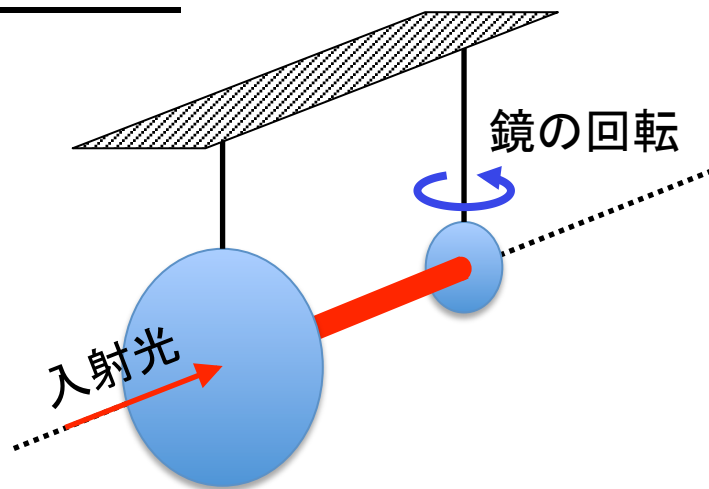


共振器の回転方向不安定性

Top view



3D view



光反バネ効果

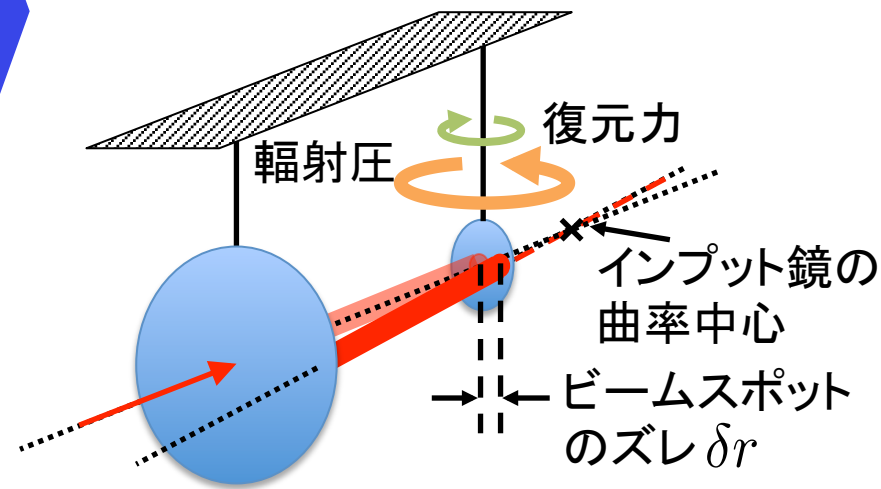
輻射圧

ビームスポット
のズレ δr

機械的バネ効果

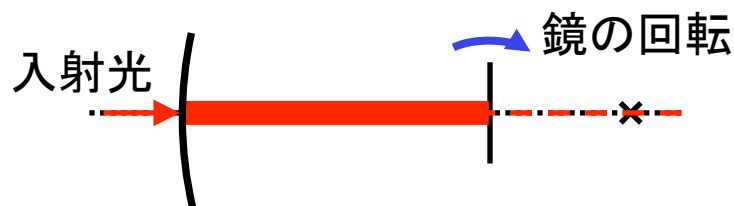
復元力

インプット鏡の
曲率中心

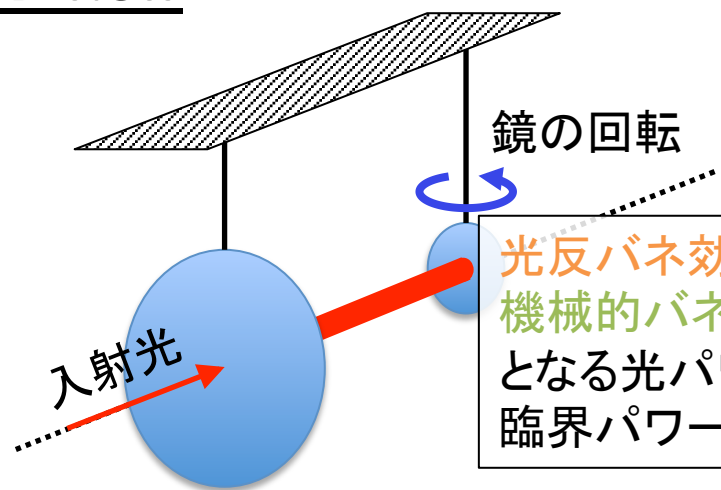


共振器の回転方向不安定性

Top view



3D view



光反バネ効果 =
機械的バネ効果
となる光パワーを
臨界パワーと呼ぶ

光反バネ効果

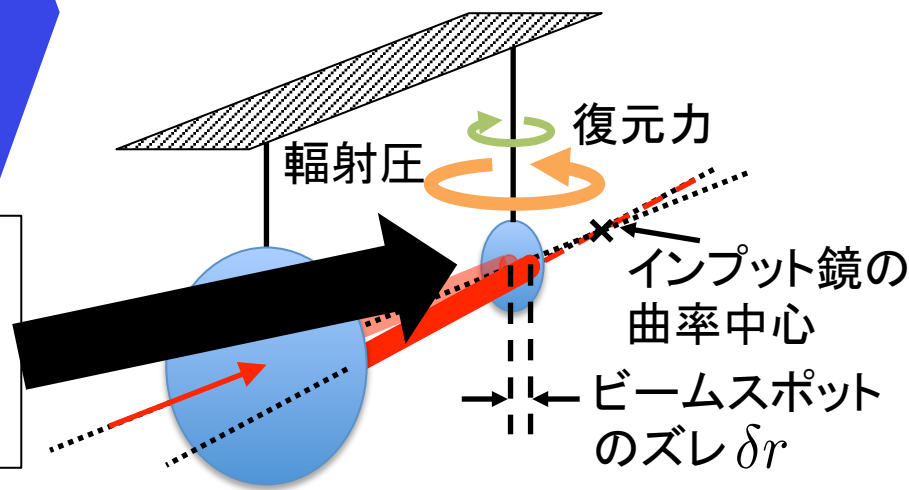
輻射圧

ビームスポット
のズレ δr

機械的バネ効果

復元力

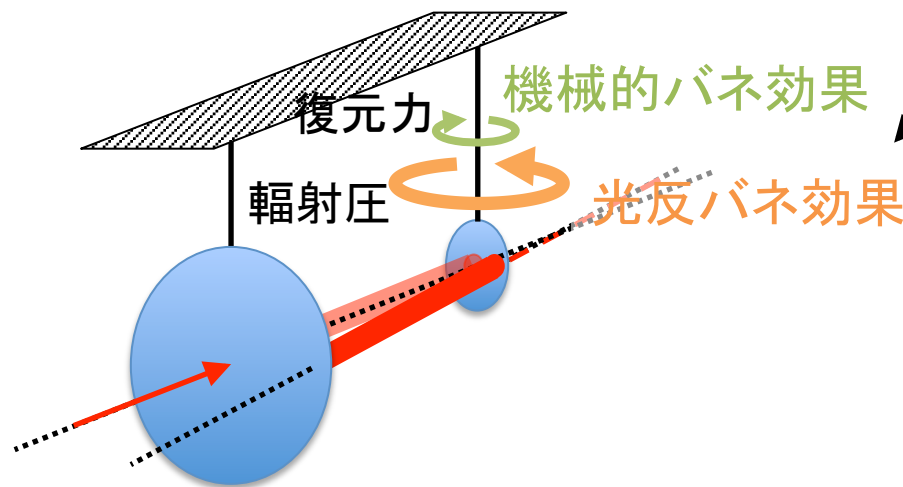
インプット鏡の
曲率中心



共振器の回転方向不安定性

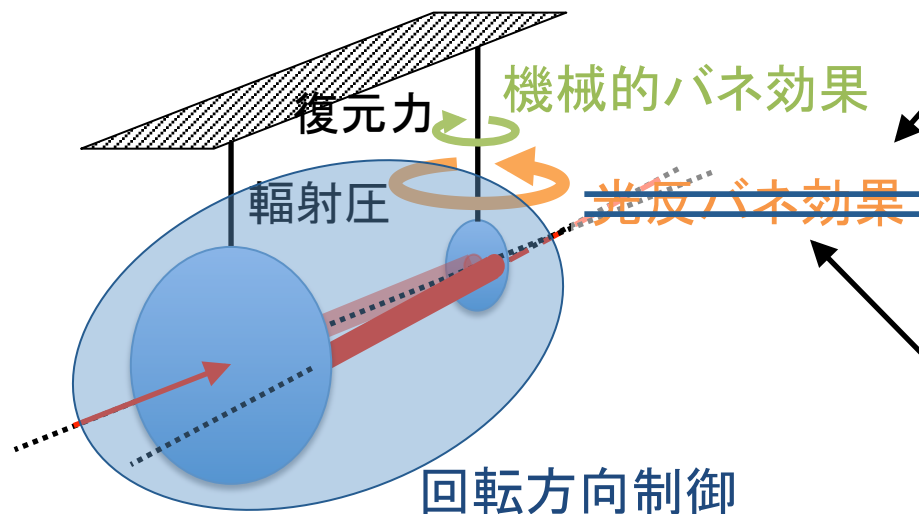
- 回転方向不安定性 (Sidles—Sigg不安定性) を緩和したい。

実験1: Sidles—Sigg不安定性の原因となる
光反バネ効果を測定



共振器の回転方向不安定性

- 回転方向不安定性 (Sidles—Sigg不安定性) を緩和したい。



実験1: Sidles—Sigg不安定性の原因となる光反バネ効果を測定

実験2: 回転方向制御による不安定性緩和の確認

光反バネ効果の測定

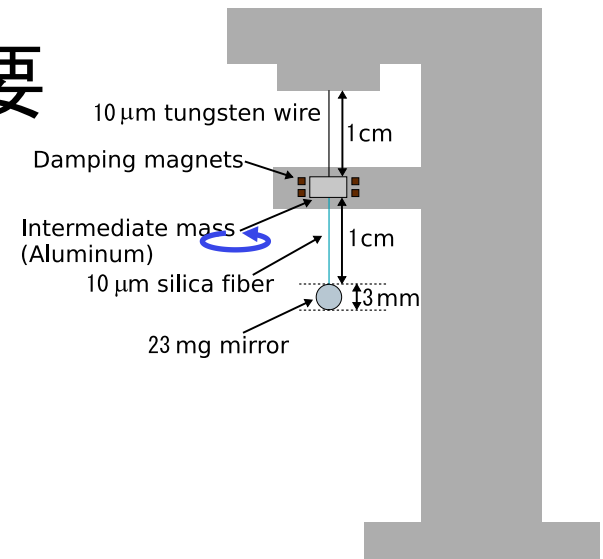
- 光反バネ効果

→ エンド鏡の 回転方向の共振周波数が低下

これを測定したい。

エンド鏡の回転運動の励起が必要

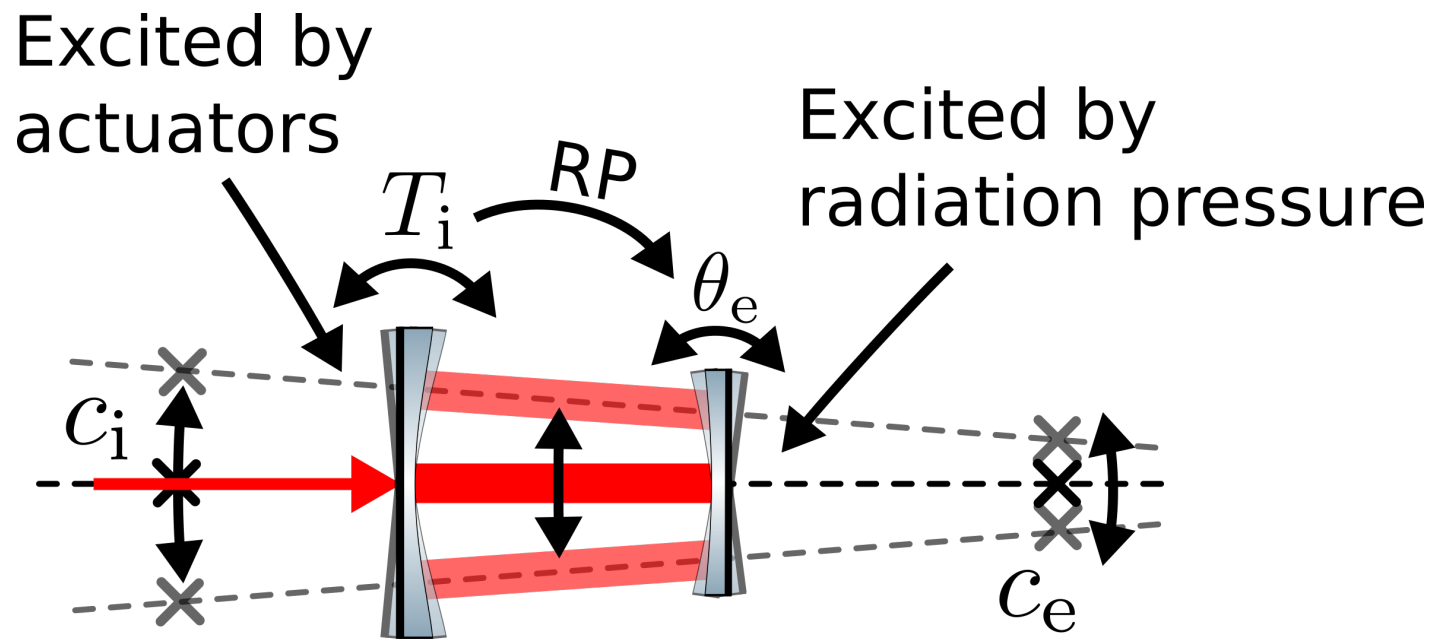
エンド鏡が小さいので、
直接励起することはできない。



図：エンド鏡懸架系の模式図。

光反バネ効果の測定

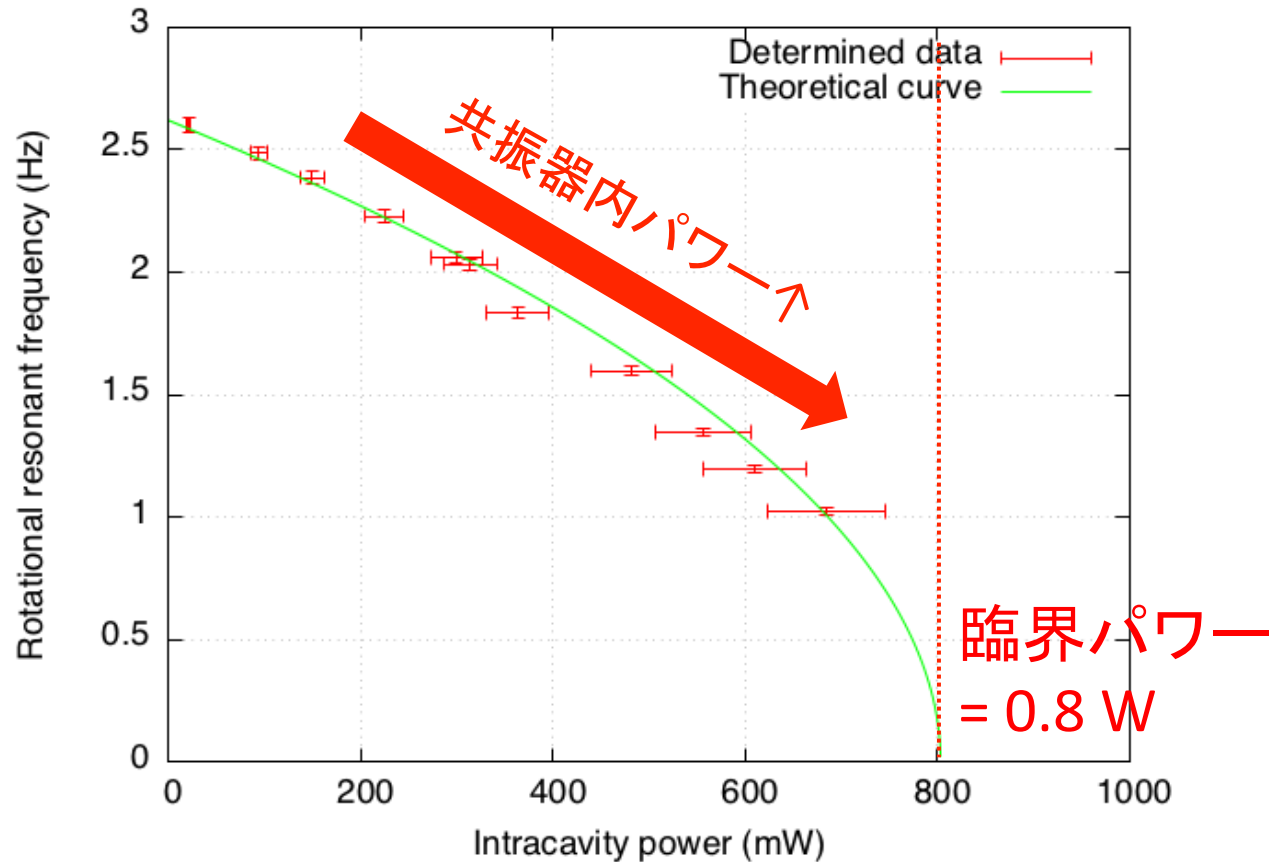
- 遠隔励起という新しい手法を考案
- 遠隔励起のイメージ図



図：遠隔励起のイメージ図。

光反バネ効果の測定

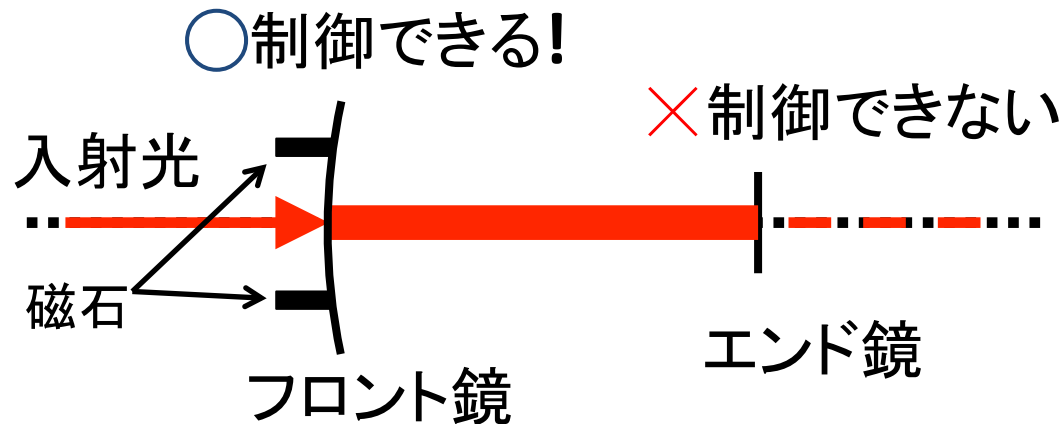
- エンド鏡の回転方向共振周波数の測定



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

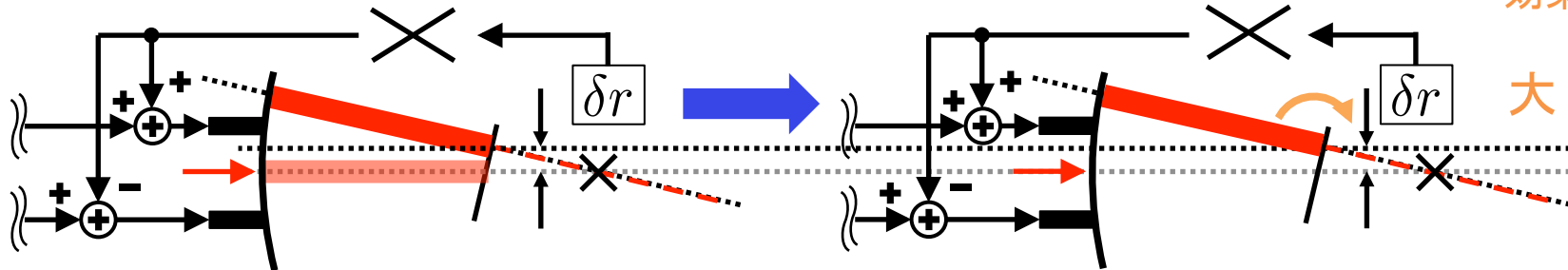
共振器の回転方向制御

- Sidles—Sigg不安定性を緩和したい
 - 鏡の回転運動を制御したい
 - エンド鏡は制御できない
 - フロント鏡を制御すれば良い

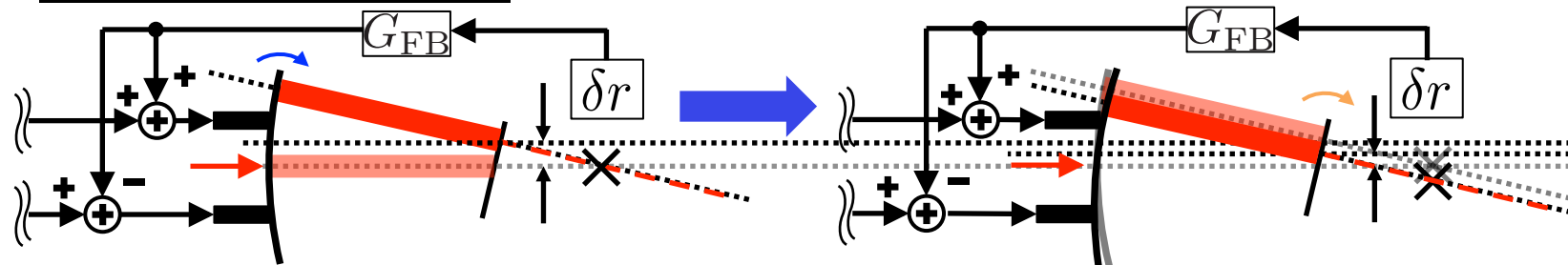


共振器の回転方向制御

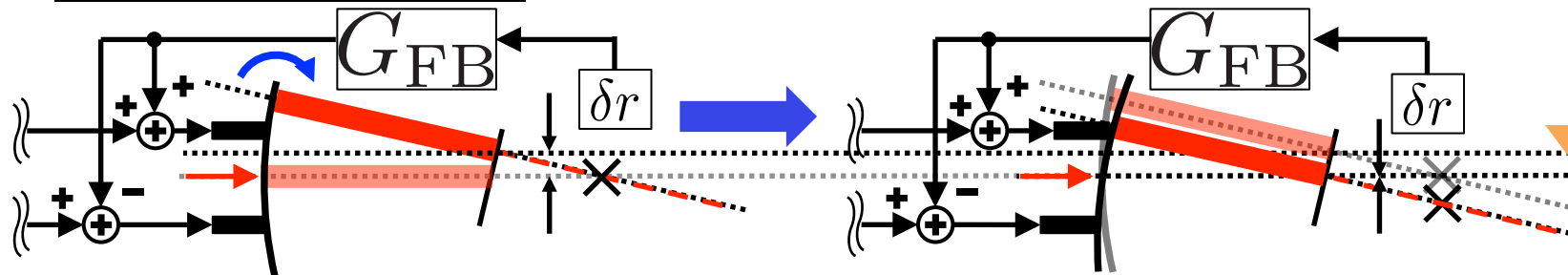
1. フィードバックなし



2. フィードバック弱



3. フィードバック強



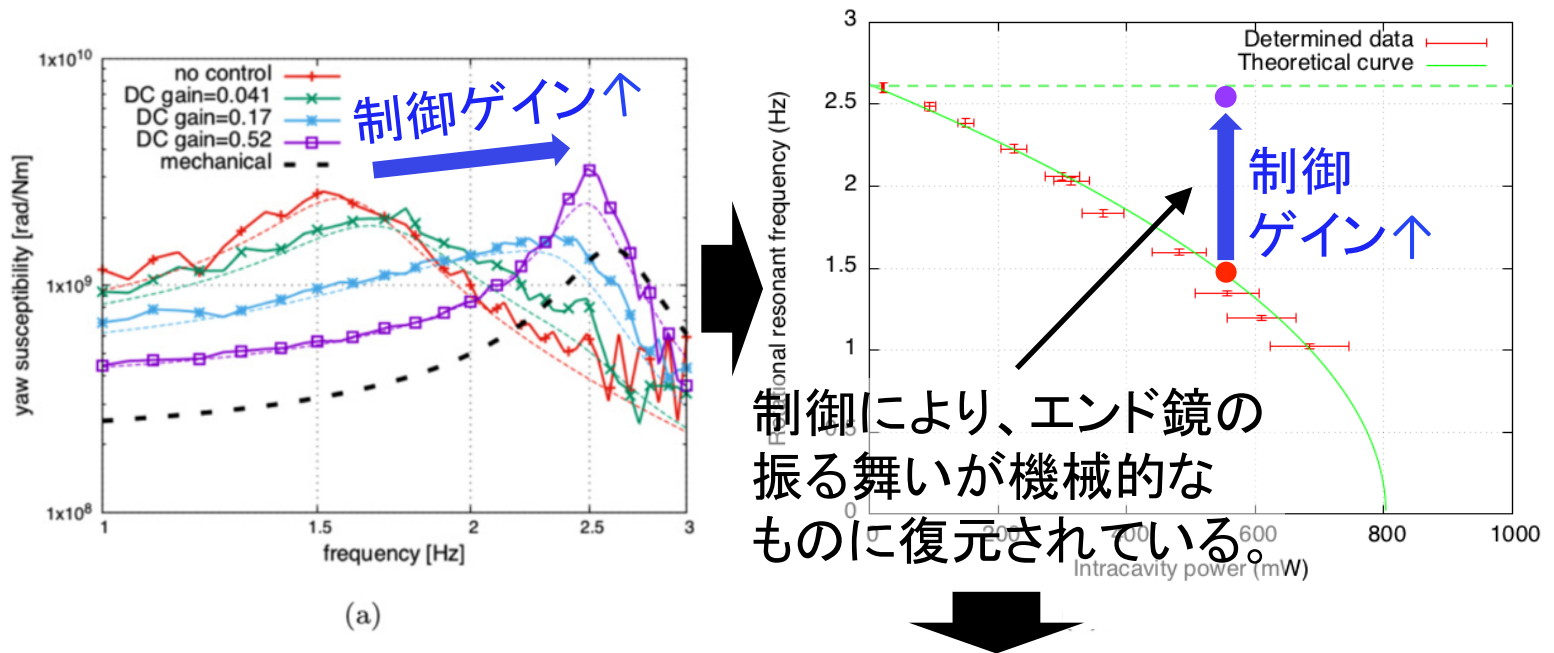
光反バネ共振
効果周波数

大 低

小 高
(機械的)

回転方向制御の効果の確認

- 回転方向制御を導入し、まず臨界パワー以下でエンド鏡の実効的感受率を測定した。



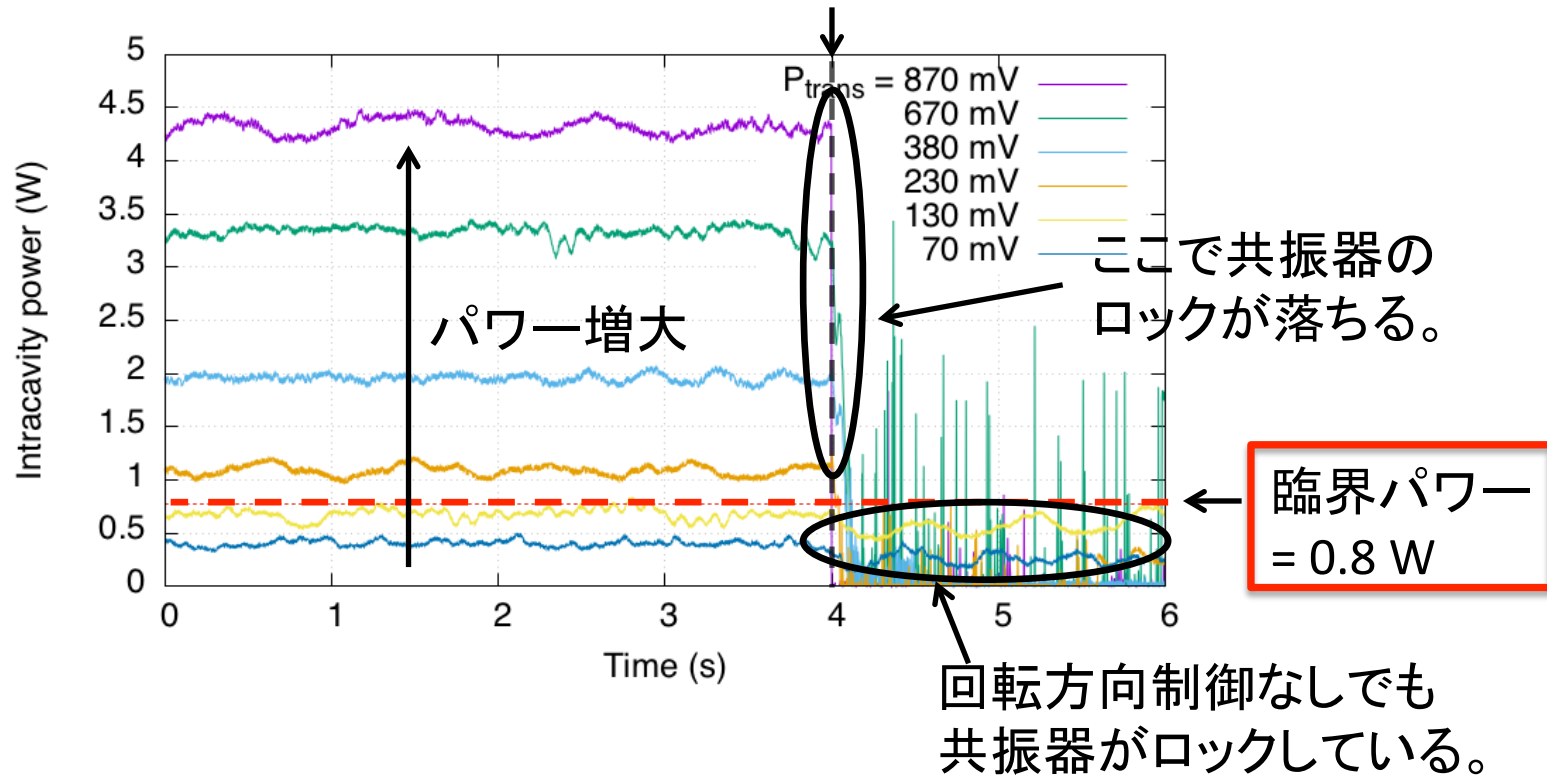
光反バネ効果が低減されている。

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

- 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



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. 重力波検出器と量子雑音
2. 量子雑音観測のための実験設計
3. 実験方法と結果
4. 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、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を行った
- 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。