

重力波望遠鏡KAGRAの 低温動作に向けた主干涉計開発

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

麻生洋一、宗宮健太郎、宮川治、苔山圭以子、廣瀬榮一、

阿久津智忠、榎本雄太郎、小森健太郎、有富尚紀、

下田智文、新井宏二、山本博章

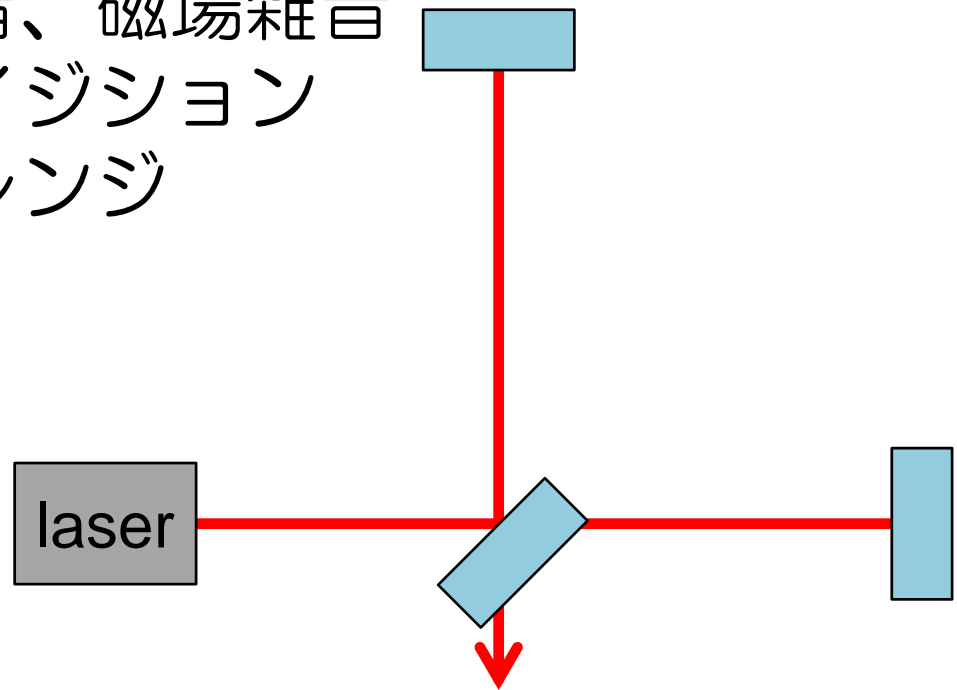
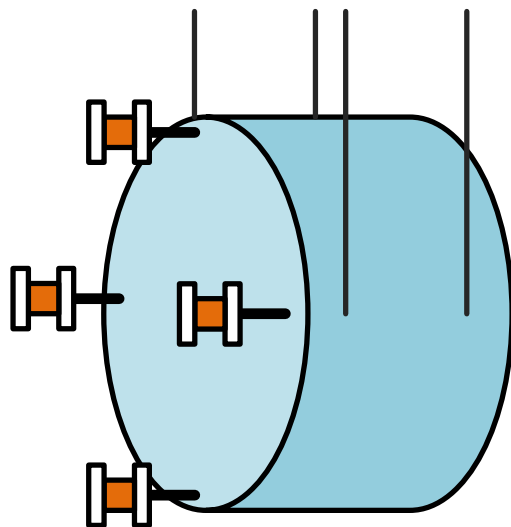
国立天文台、東京工業大学、東京大学宇宙線研究所、

東京大学、カリフォルニア工科大学

Thanks to: 正田亜八香、奥富弘基、宮本昂拓、田中宏樹

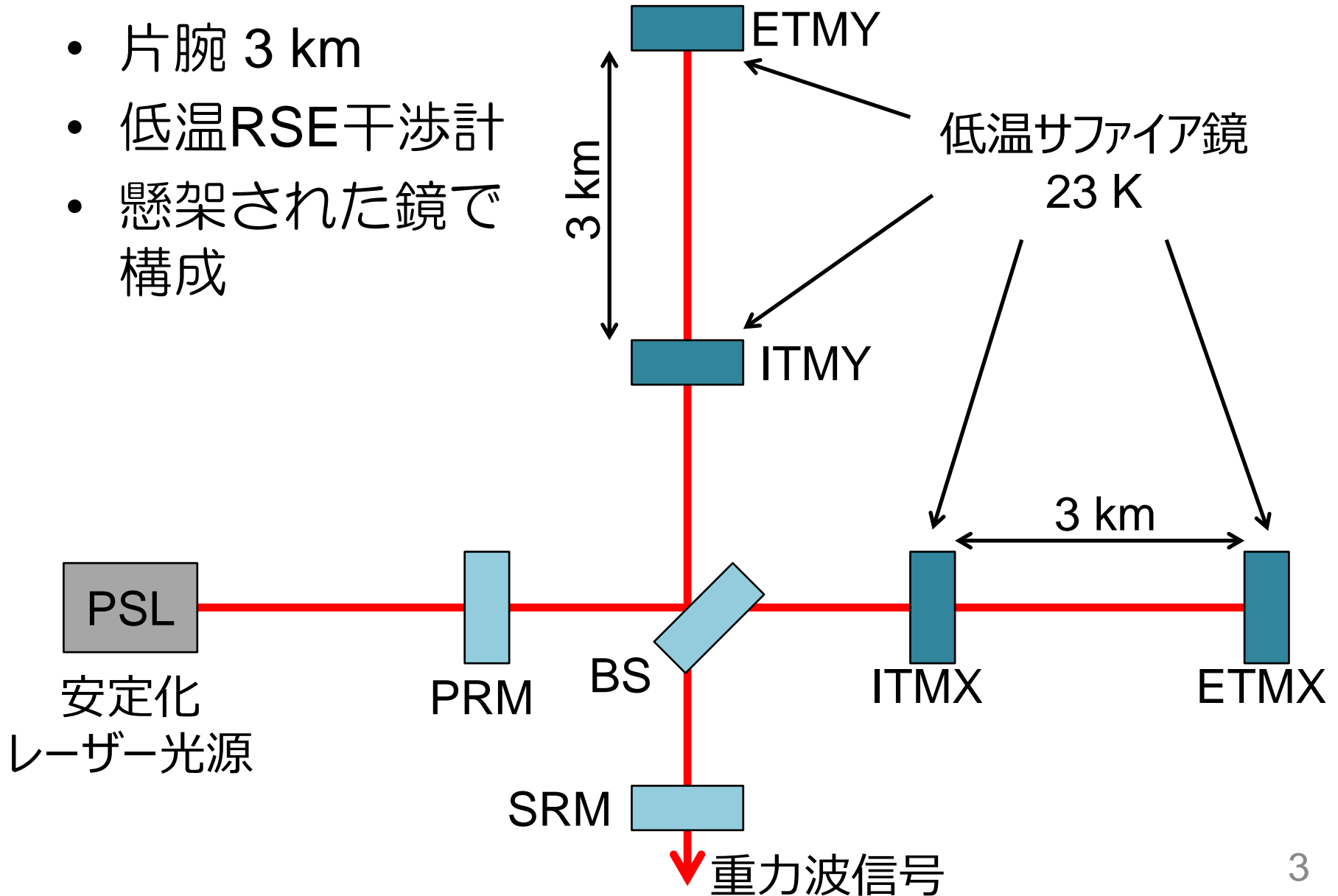
概要

- KAGRAはレーザー干渉計型重力波望遠鏡
- 高感度で動作させるためには鏡間の距離の高精度な制御が必要
- そのために必要な鏡のアクチュエータを設計した
アクチュエータ雑音、磁場雑音
制御とロックアクイジション
のために十分なレンジ



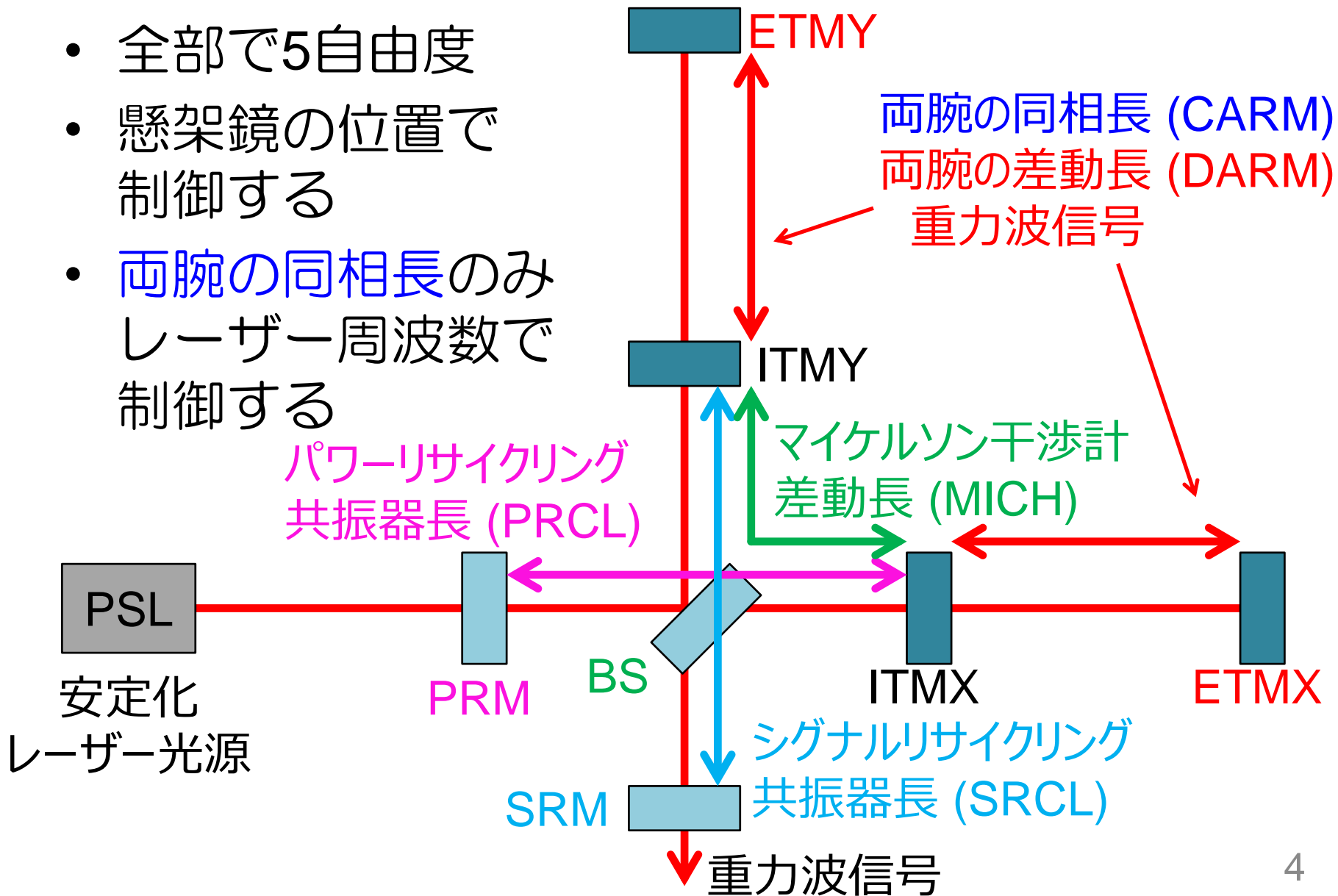
KAGRAの主干渉計構成

- 片腕 3 km
- 低温RSE干渉計
- 懸架された鏡で構成



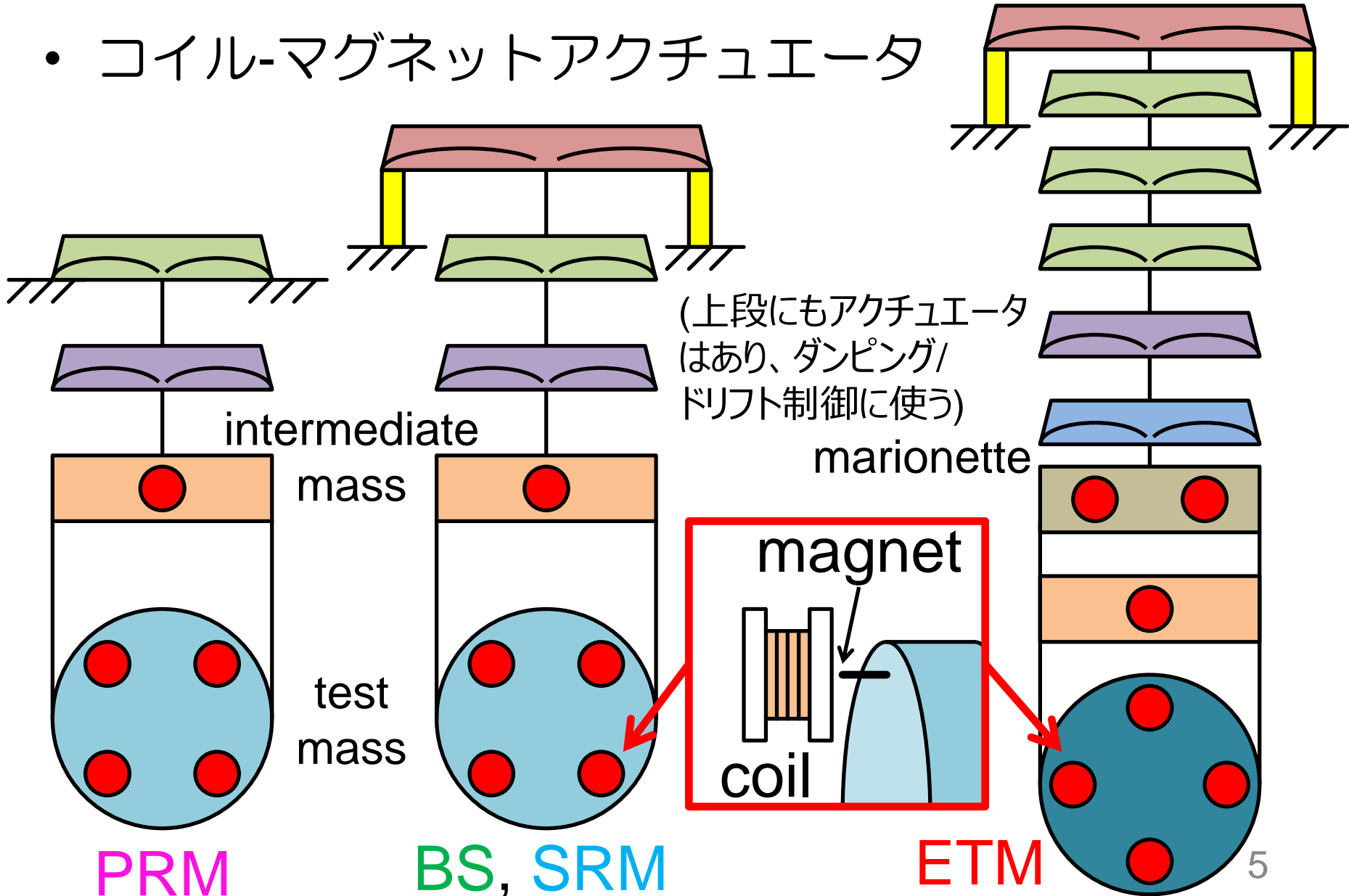
長さ制御

- 全部で5自由度
- 懸架鏡の位置で制御する
- 両腕の同相長のみ
レーザー周波数で制御する



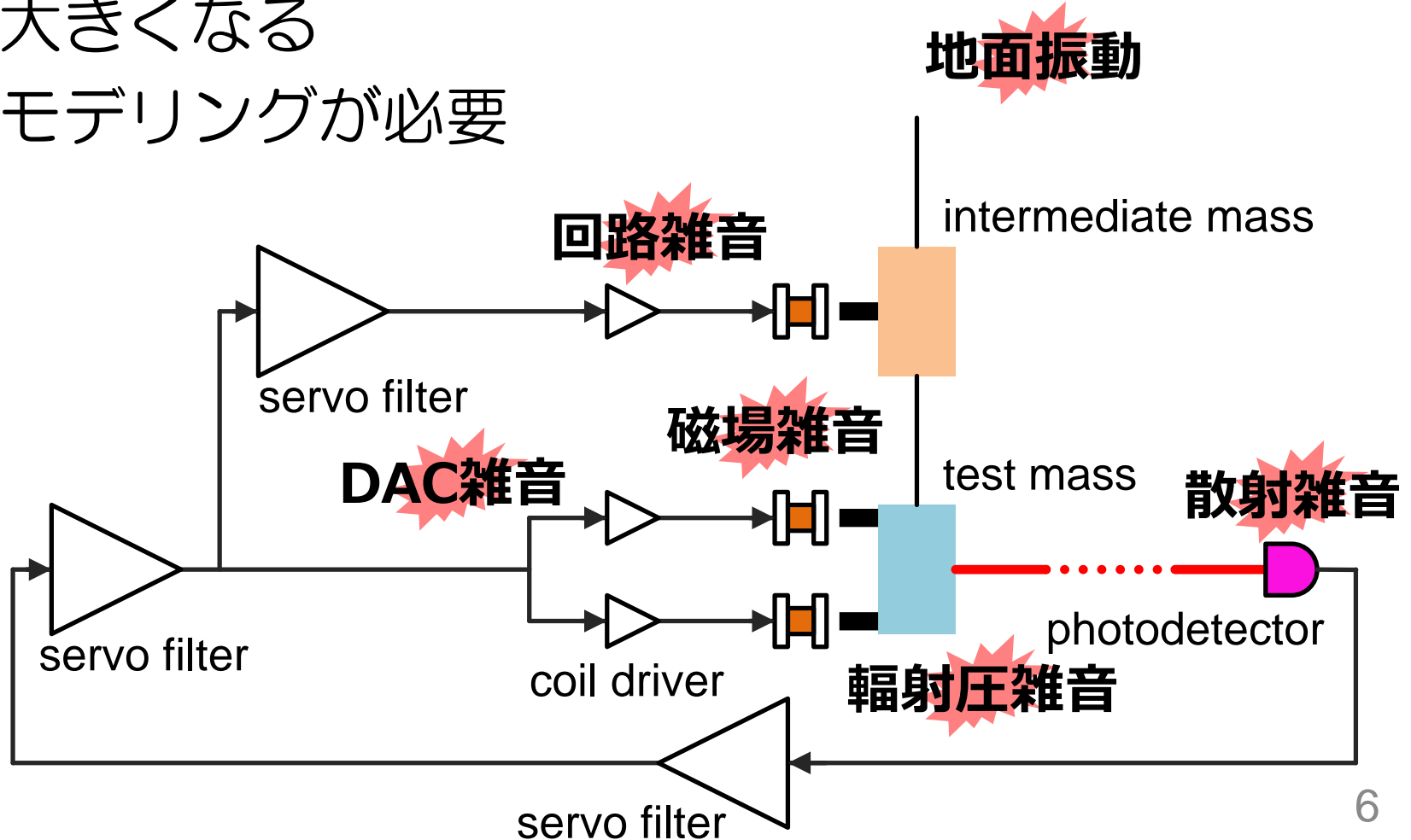
懸架系のアクチュエータ

- コイル-マグネットアクチュエータ



アクチュエータのレンジと雑音

- さまざまな雑音を抑えるだけのレンジが必要
- 強すぎるとアクチュエータ雑音、磁場雑音が大きくなる
- モデリングが必要

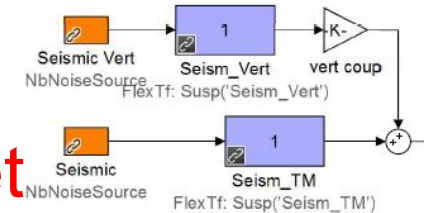


モデリング



- Simulink NoiseBudget (by Chris Wipf)でモデル化

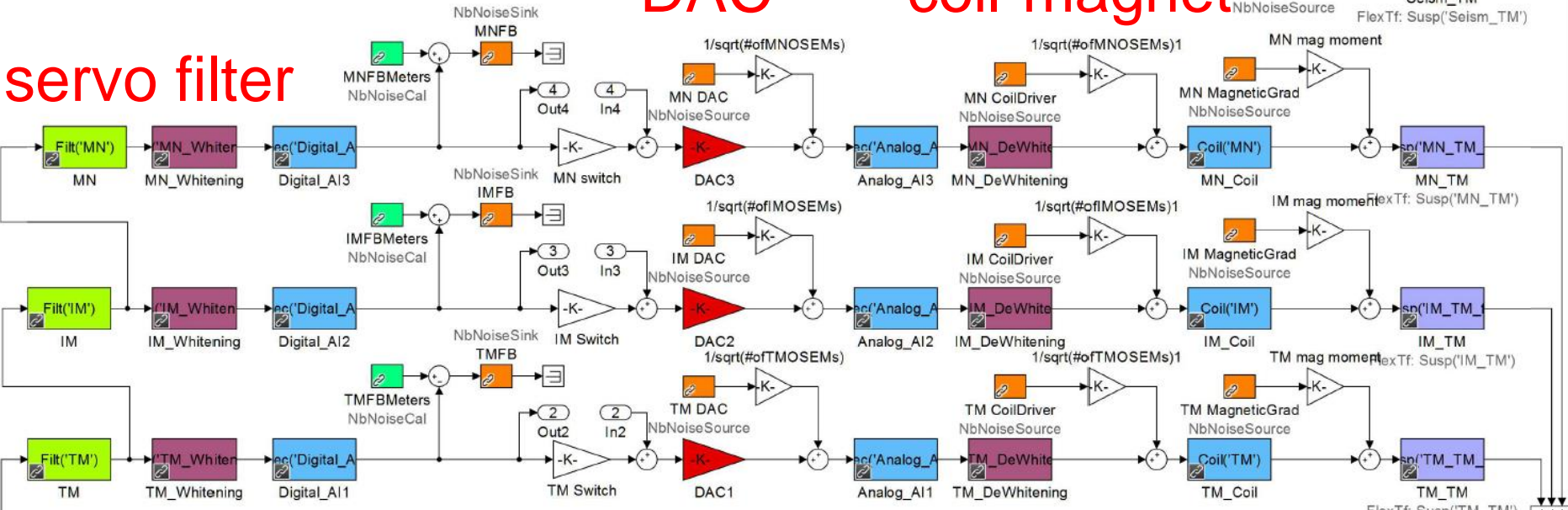
seismic noise



DAC

coil-magnet

servo filter

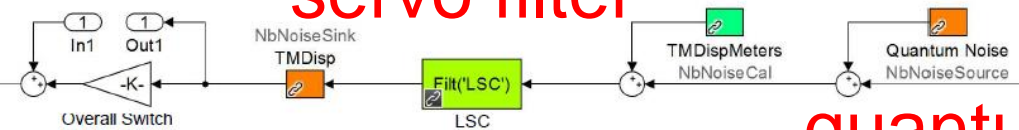


servo filter

coil drivers

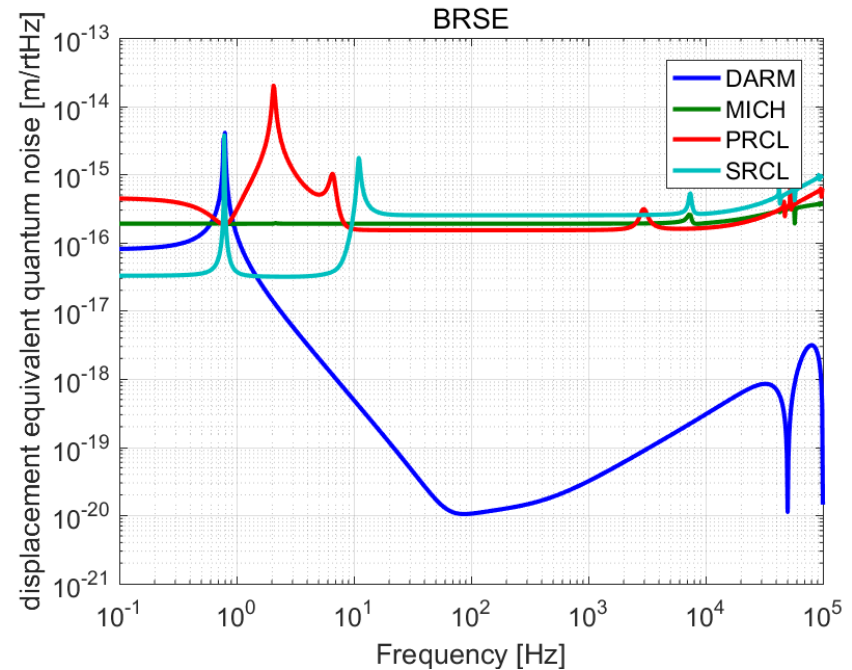
suspension

quantum noise



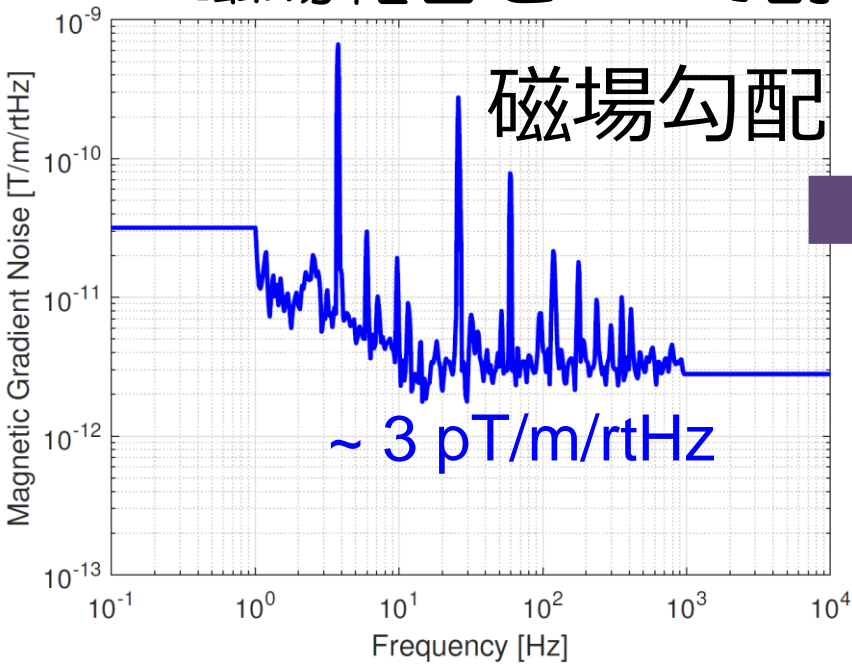
考えている雑音

- 地面振動雑音
測定値を使用
- DAC雑音
測定値を使用
- コイルドライバ回路雑音
回路モデル計算の
計算値を使用
- 量子雑音
散射雑音+輻射圧雑音
干渉計シミュレーション結果を使用(Optickle)
- 磁場雑音
次ページ

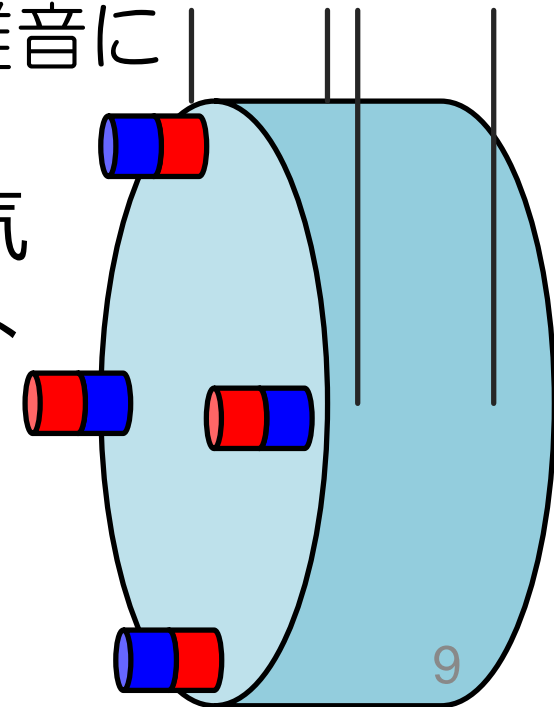


磁場雑音

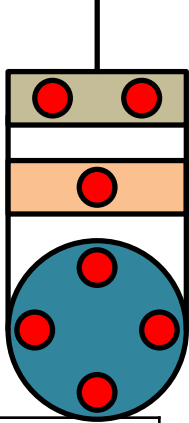
- 磁場勾配と磁石のばらつきによる磁気モーメントのカップリングが一番効く
- 低温真空槽内で測定した磁場雑音を使用
センサー雑音に制限
(詳しくは田中くんの講演17pK25-4)
- 磁場雑音を1 mで割って磁場勾配雑音に



残留磁気
モーメント



各鏡のアクチュエータ

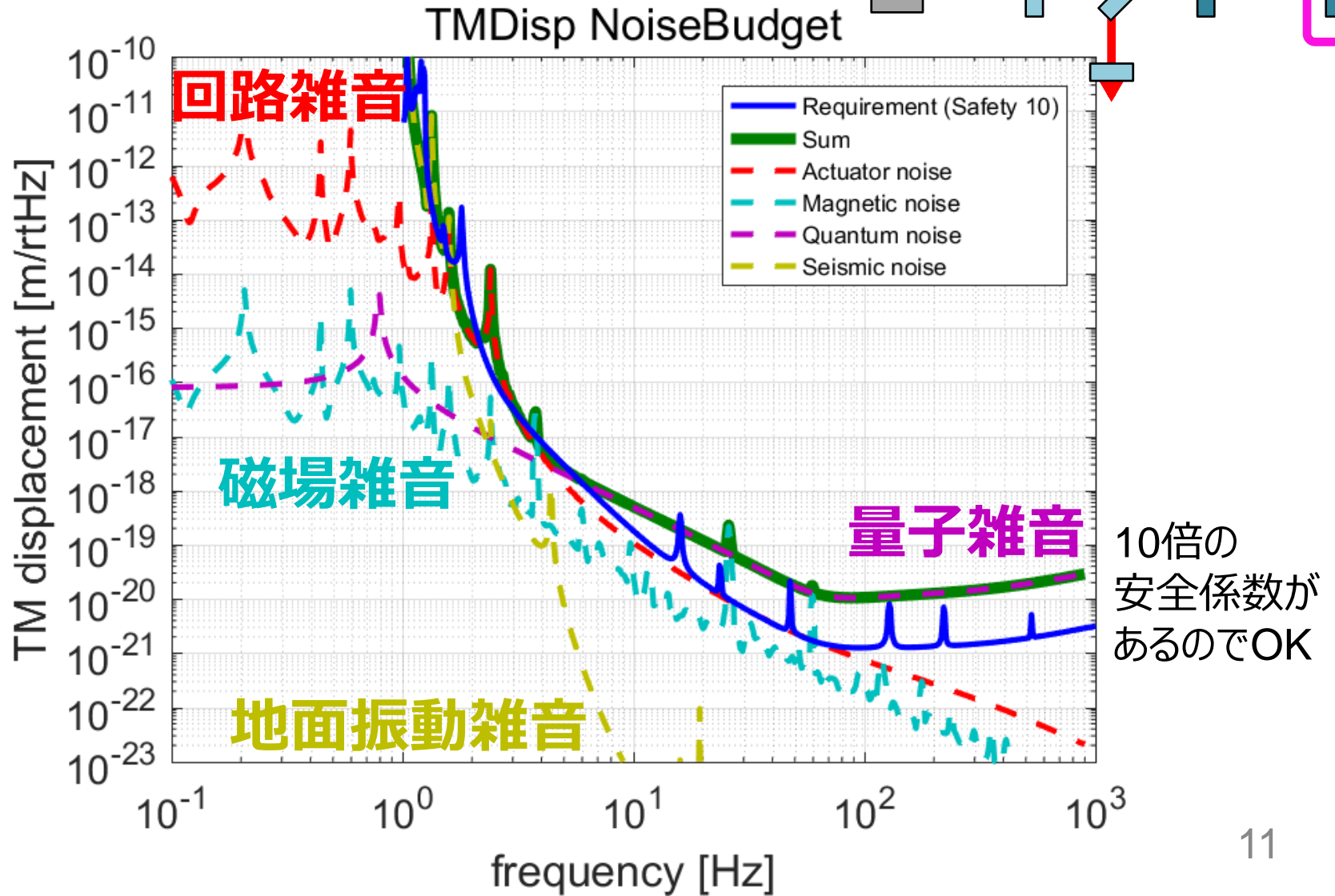


- コイルの巻数と磁石の大きさ(mm)と
コイルドライバ出力抵抗(小さいほうが強い)

| | PRM | SRM | BS | ETM |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Marionette | なし | なし | なし | 585巻 φ2 x L 2 1.4 kΩ |
| Intermediate mass | 600巻 φ10 x L 10 80 Ω | 600巻 φ10 x L 10 7.8 kΩ | 600巻 φ10 x L 10 7.8 kΩ | 585巻 φ2 x L 2 1.4 kΩ |
| Test mass | 600巻 φ6 x L 3 80 Ω | 600巻 φ2 x L 5 7.8 kΩ | 600巻 φ2 x L 3 7.8 kΩ | 88巻 φ2 x L 2 7.8 kΩ |

雑音 (ETM)

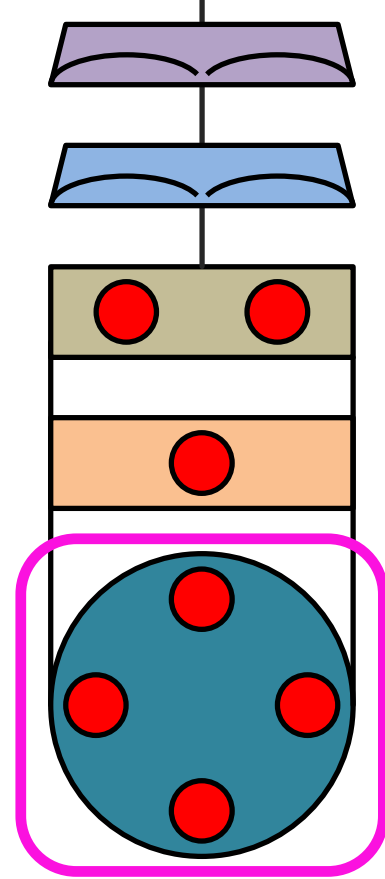
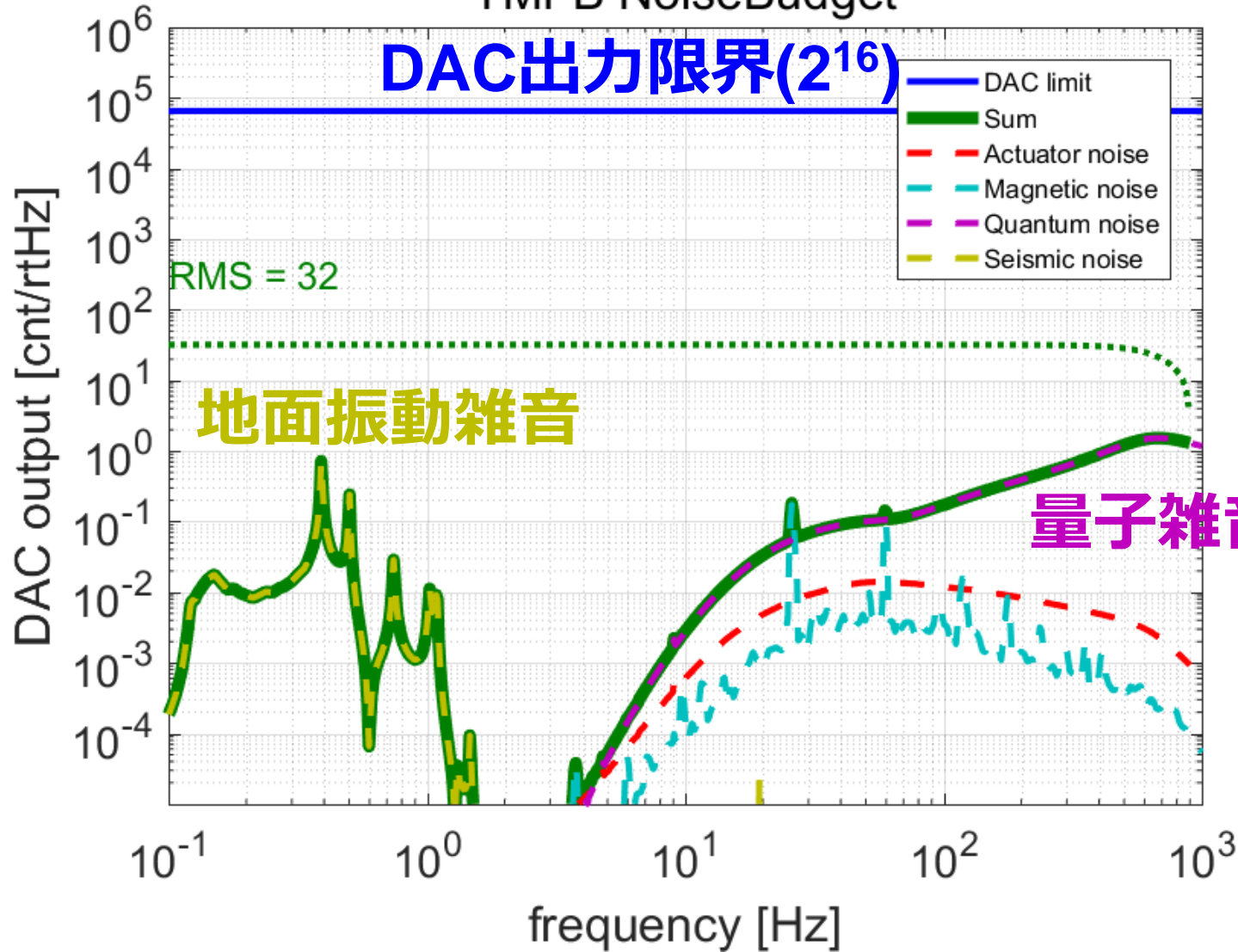
- 変位雑音要求値を満たす



レンジ (ETM TM)

- TMは大丈夫

TMFB NoiseBudget

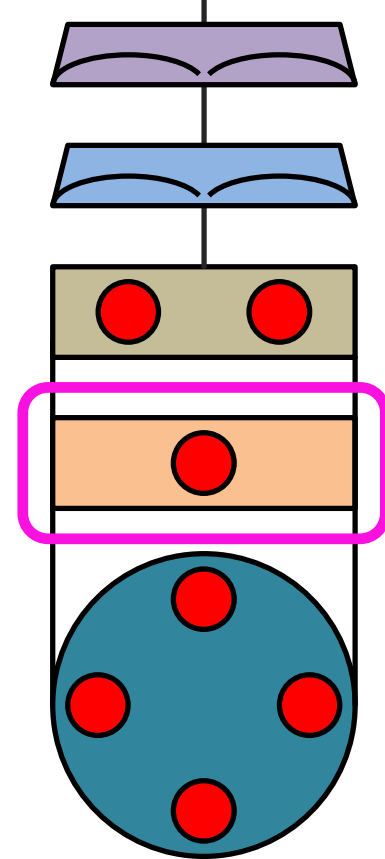
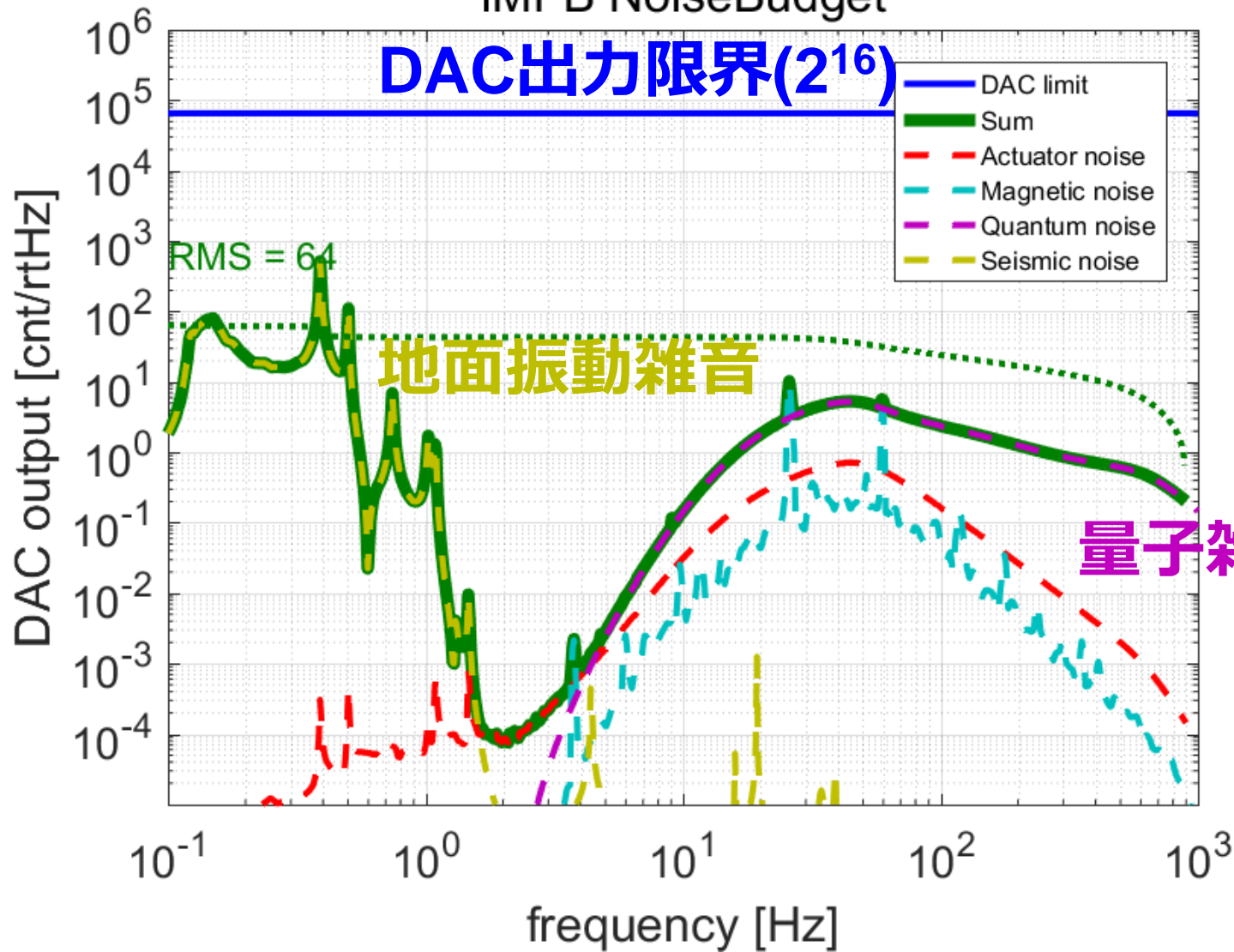


RMSが
DAC限界の
1/50以下
なのが要求値

レンジ (ETM IM)

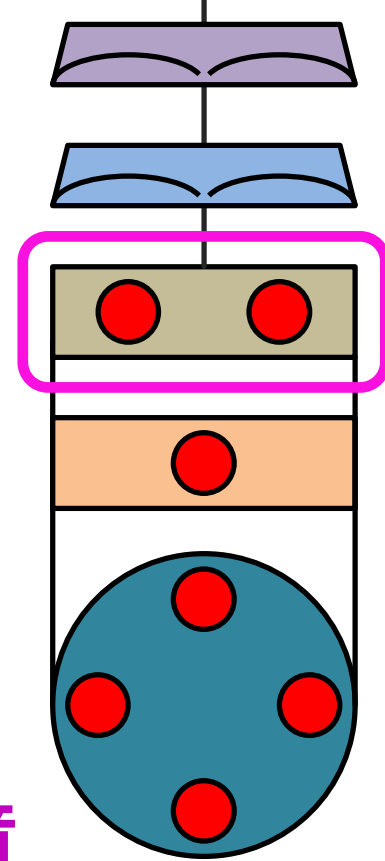
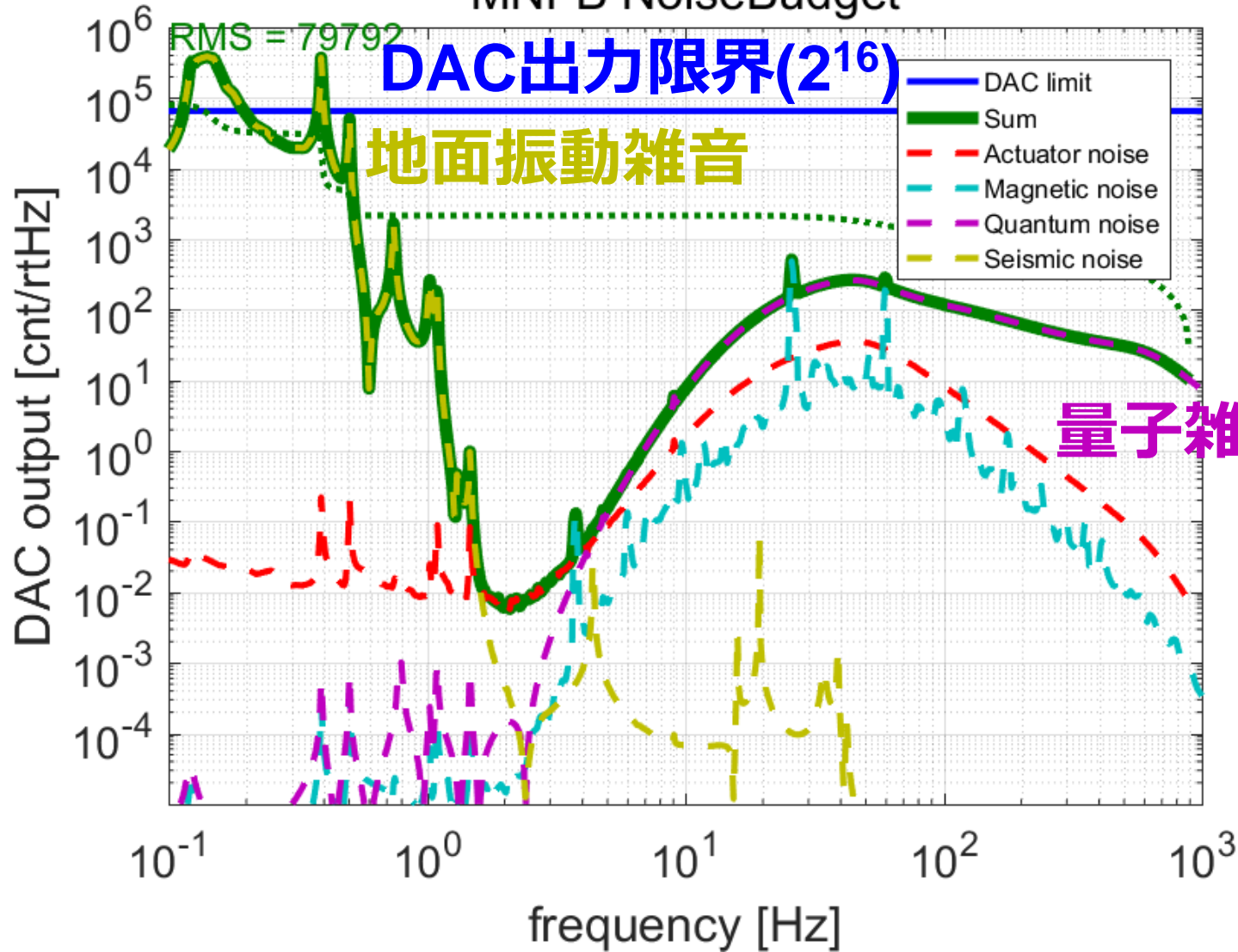
- IMも大丈夫

IMFB NoiseBudget



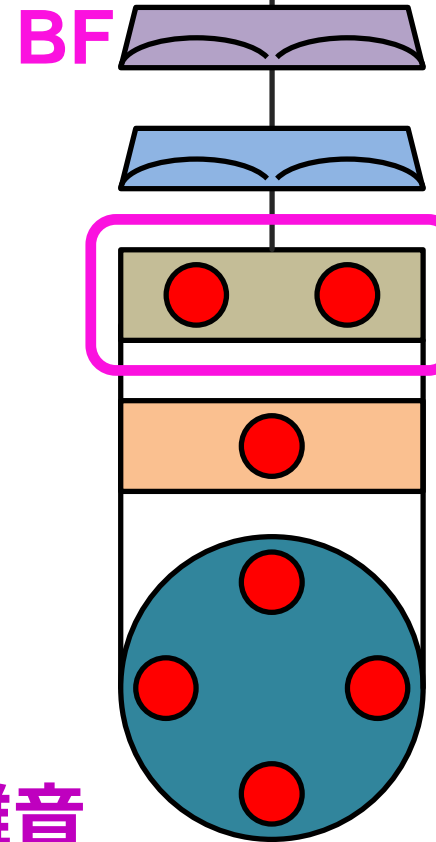
レンジ (ETM MN)

- MNはレンジを超えてしまう
MNFB NoiseBudget

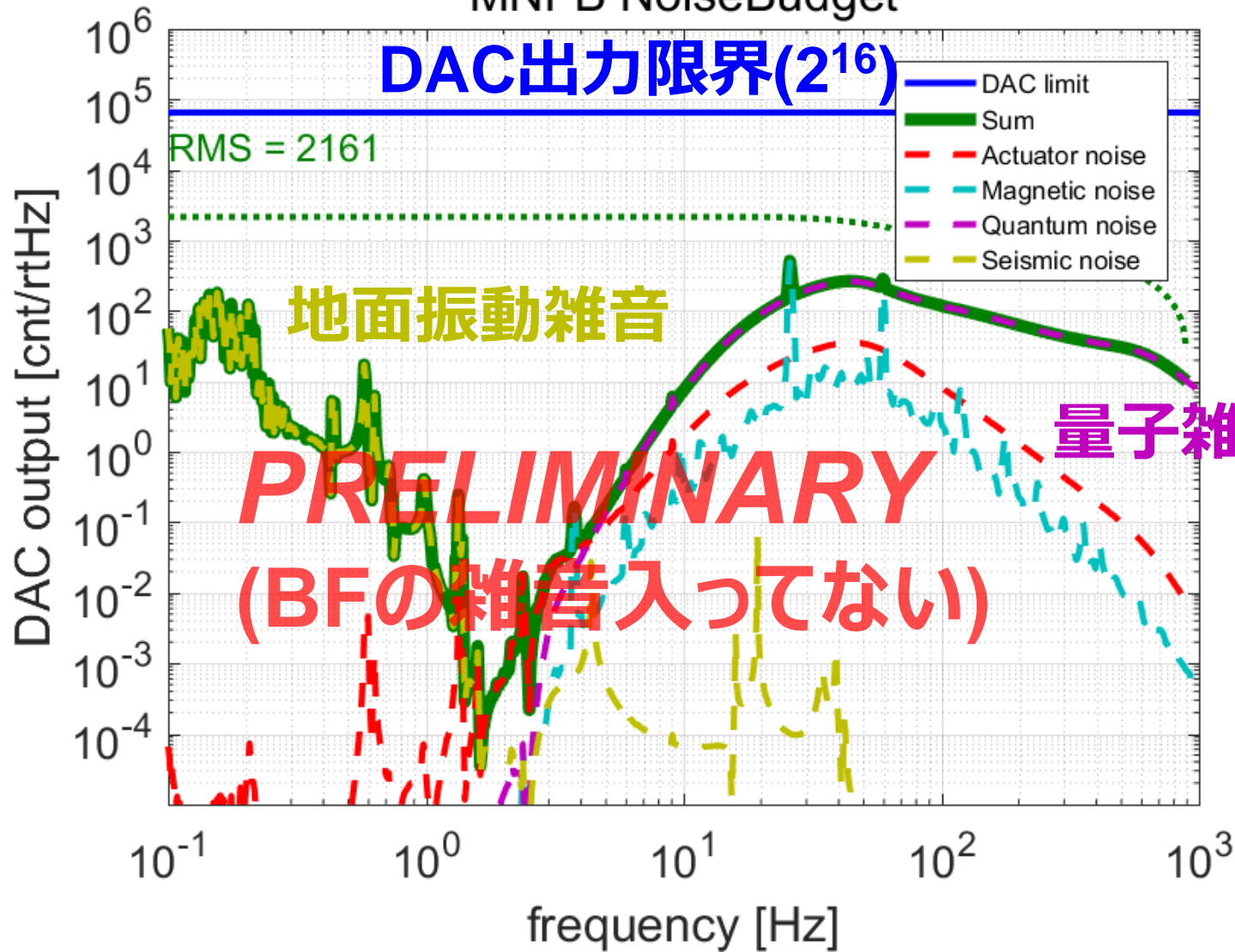


さらに上段への
フィードバックを
考慮に入れる

レンジ (ETM MN)



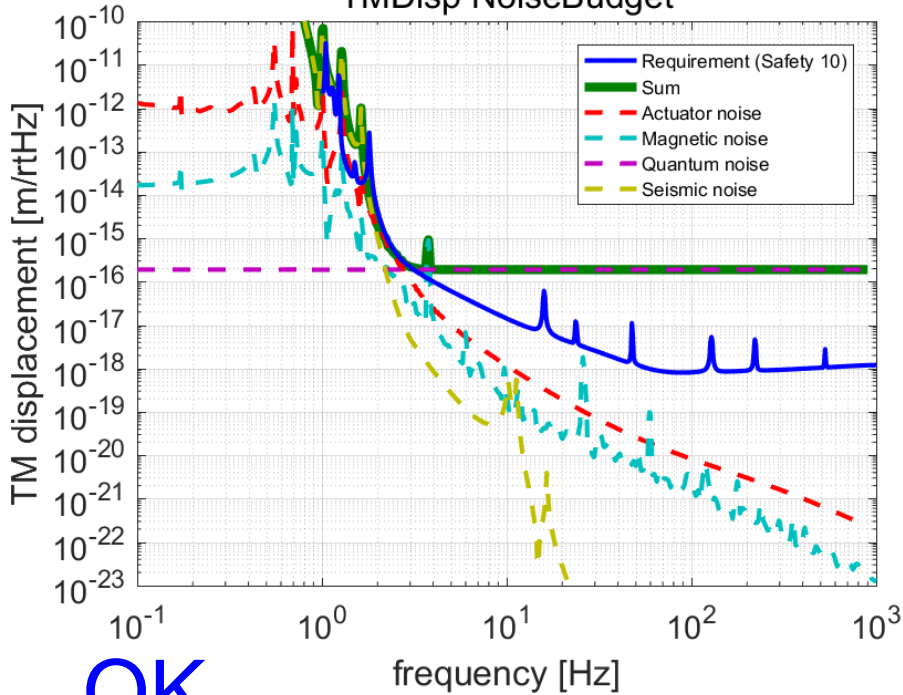
- 上段(BF)を制御に追加した場合
MNFB NoiseBudget



可能であれば
MNの磁石も
強くする？

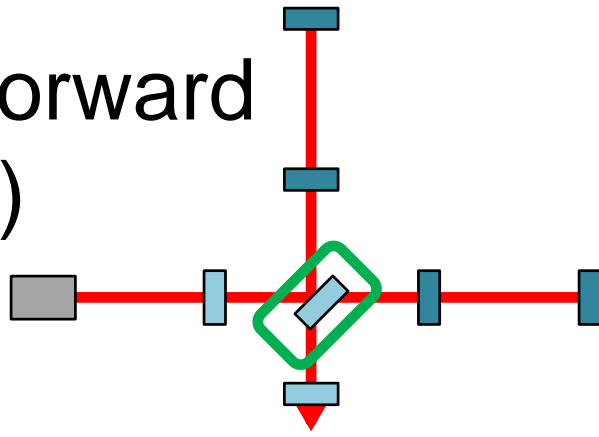
BSの結果

TMDisp NoiseBudget

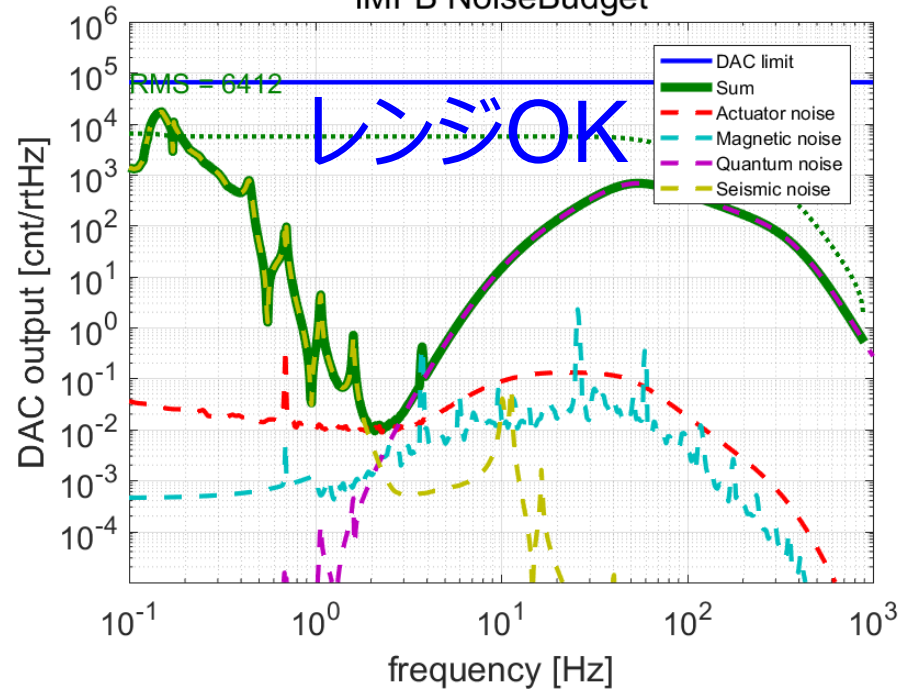


OK

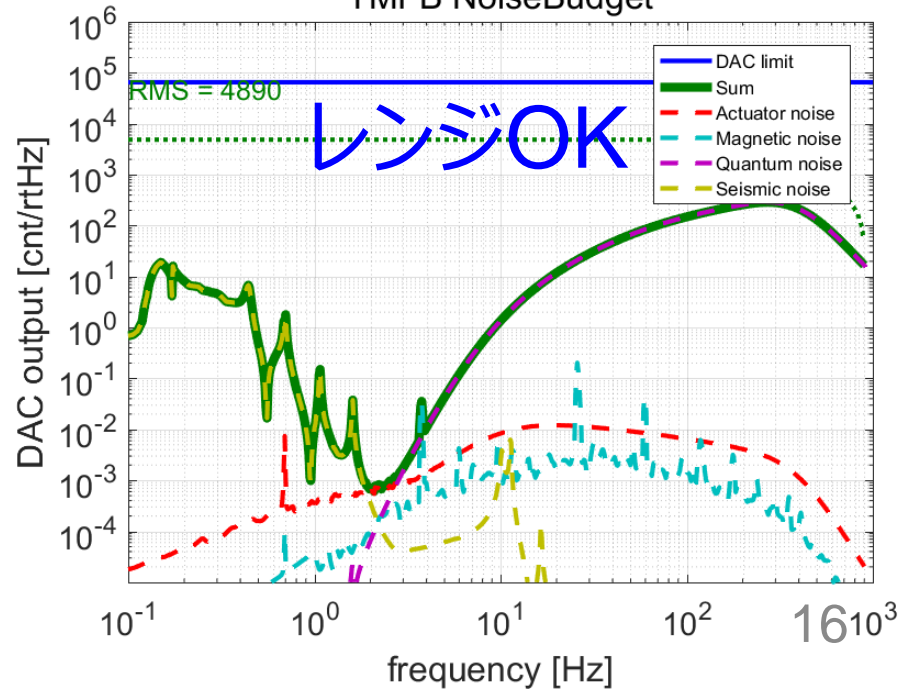
(feed forward
は必要)



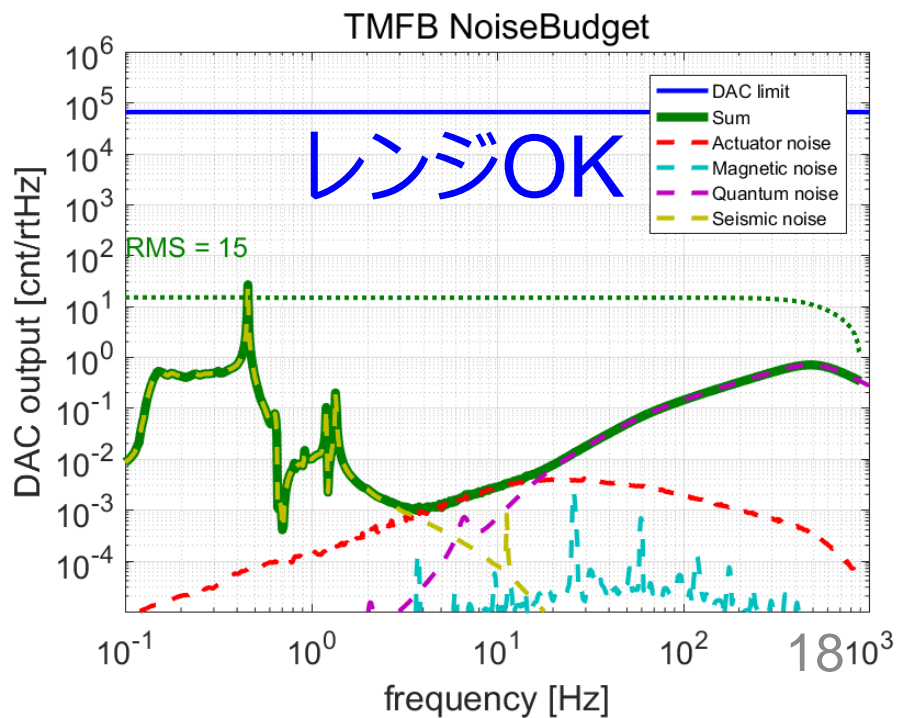
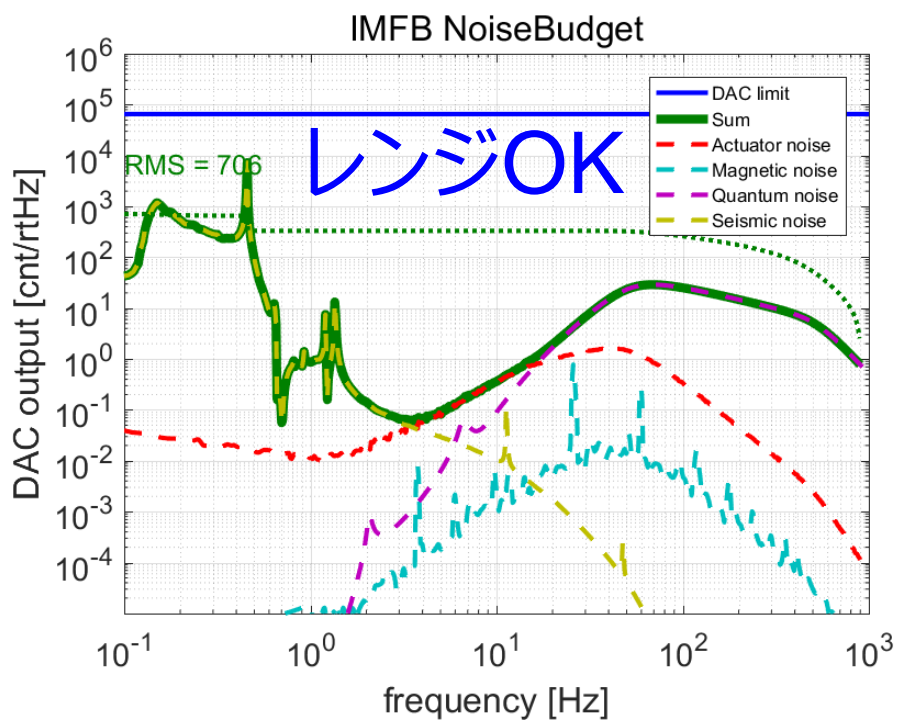
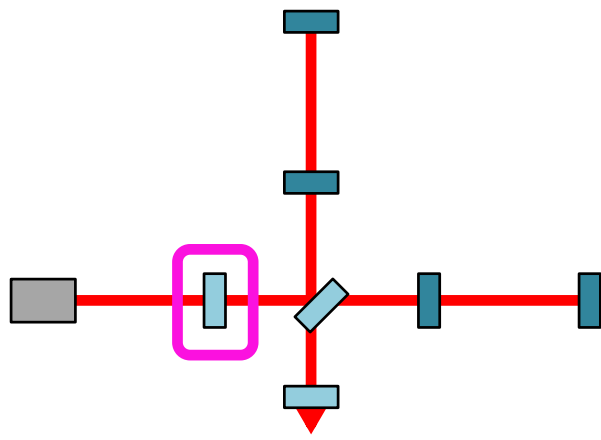
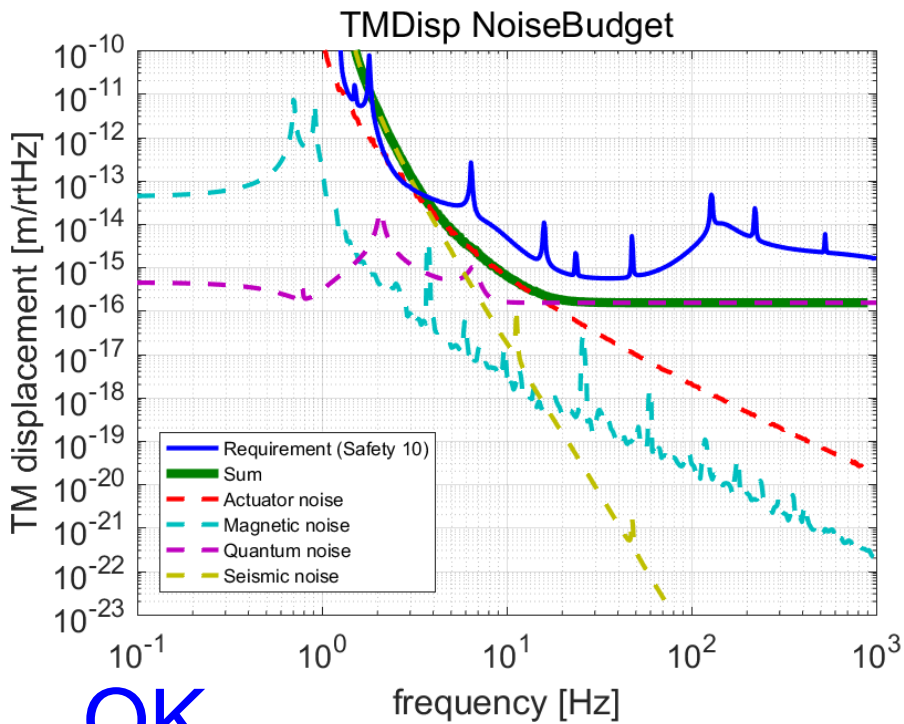
IMFB NoiseBudget



TMFB NoiseBudget

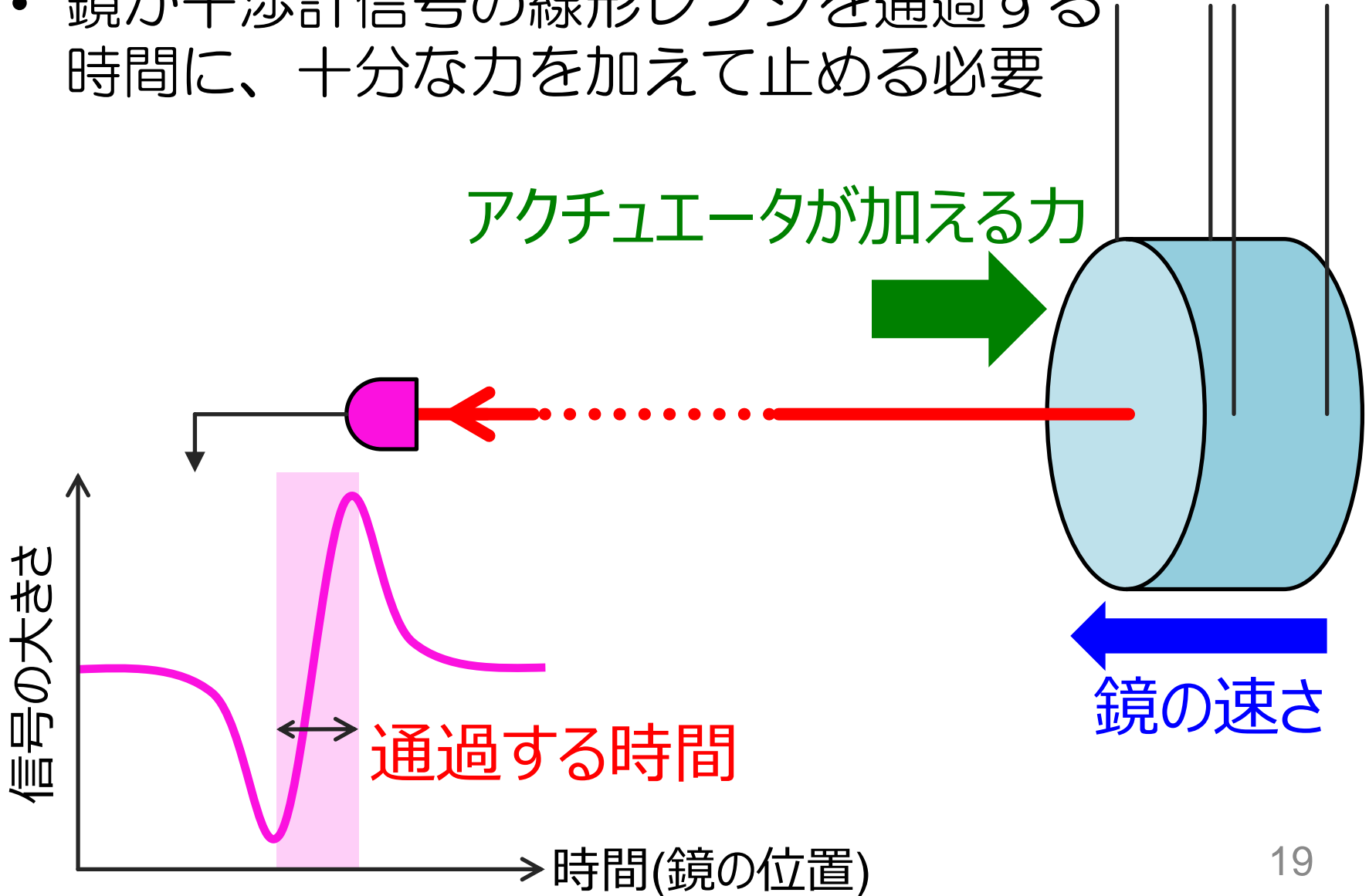


PRMの結果



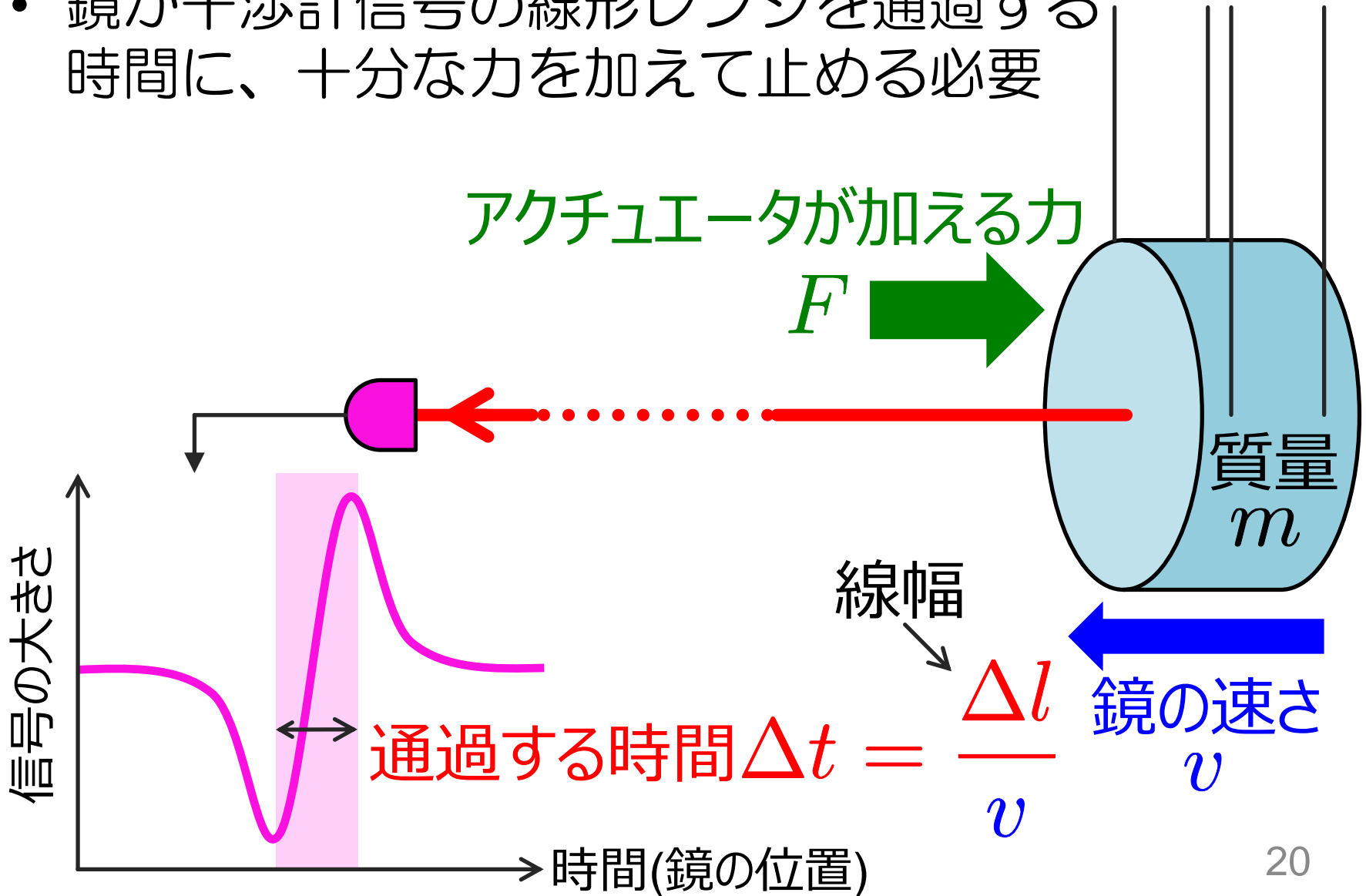
ロックアクイジション

- 鏡が干渉計信号の線形レンジを通過する時間に、十分な力を加えて止める必要



ロックアクイジション

- 鏡が干渉計信号の線形レンジを通過する時間に、十分な力を加えて止める必要



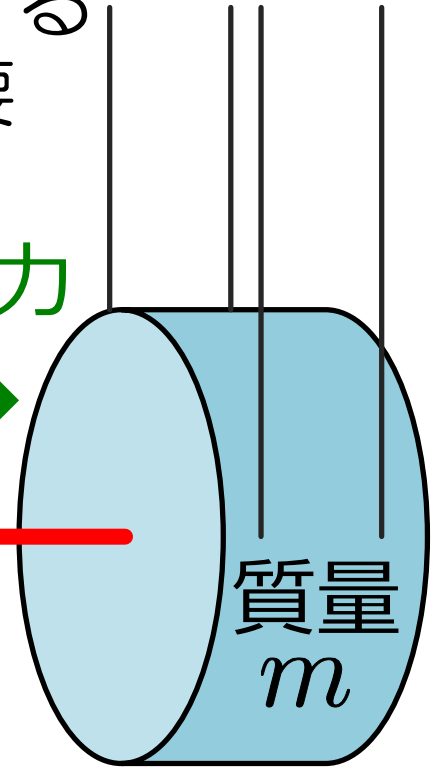
ロックアクイジション

- 鏡が干渉計信号の線形レンジを通過する時間に、十分な力を加えて止める必要

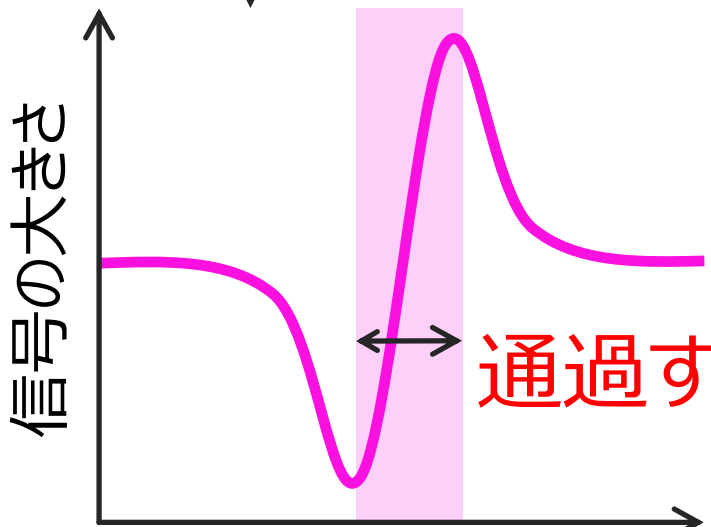
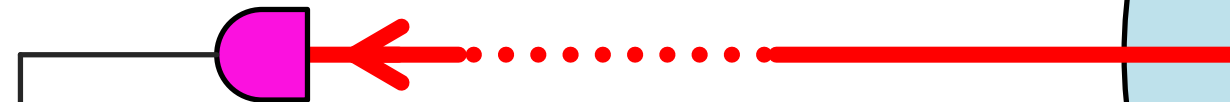
$$F \Delta t = mv$$

力積 運動量

アクチュエータが加える力



質量
 m



線幅

$$\text{通過する時間 } \Delta t = \frac{\Delta l}{v}$$



鏡の速さ
 v

速度への上限值

- アクチュエータが加えられる力の最大値から、鏡の速度への上限值が決まる

$$v < \sqrt{\frac{F_{\max} \Delta l}{m}}$$

| | PRM | SRM | BS | ETM |
|-----------------------------|-------------|--------------|---------------|-------------------|
| Max force F_{\max} | 65 mN | 120 uN | 71 uN | グリーンレーザーを使うので別途議論 |
| Linewidth Δl | 9 nm (PRCL) | 14 nm (SRCL) | 532 nm (MICH) | |
| Mass m | 10.8 kg | 10.8 kg | 18.9 kg | |
| Requirement on velocity v | 7.3 um/s | 0.38 um/s | 1.4 um/s | |

参考: 神岡の地面振動速度 ~ 10 um/s

まとめ

- KAGRA主干涉計の長さ制御モデルを作った
- アクチュエータ雑音、磁場雑音が変位雑音要求値を満たすか、レンズは十分かを確認
- 常温鏡についてはOK
- 低温鏡については検討中
さらに上段へのフィードバックを考慮に入れる
Marionetteにより大きい磁石？
- ロックアクイジションも大丈夫そう

