

KAGRA用防振装置の開発XVIII (制御系)

日本物理学会年次大会 @東北学院大学
2016.03.21

発表者：
総合研究大学院大学 博士1年
奥富 弘基

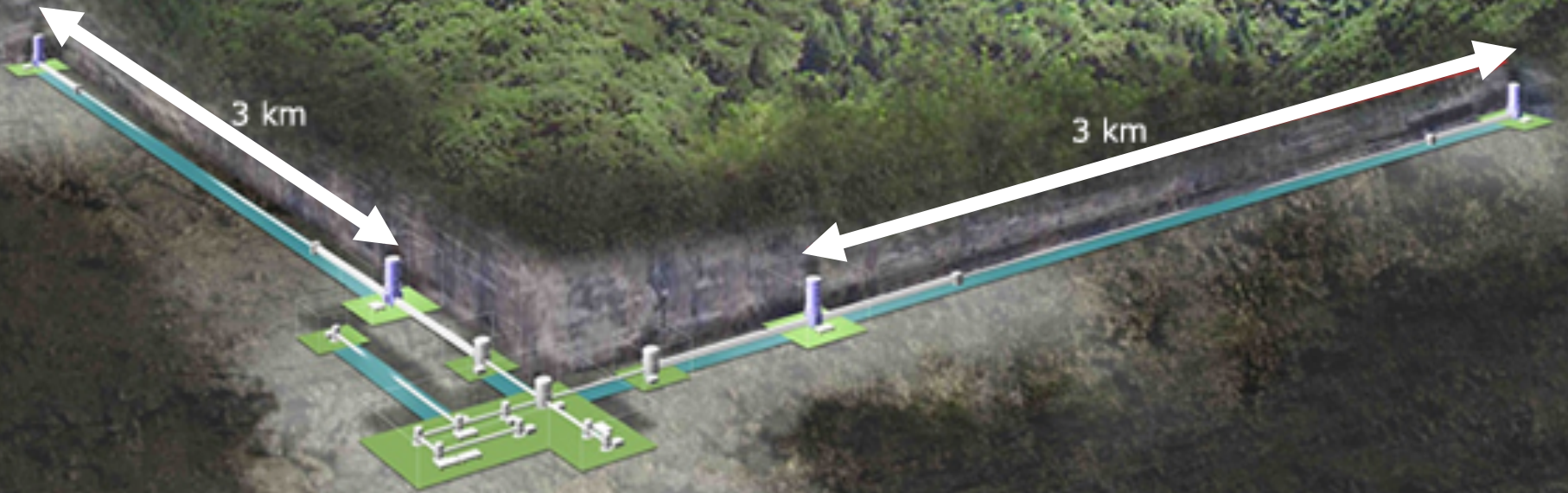
Contents

- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
 - 制御の目的
 - センサ・アクチュエータ
- ダンピング制御

Contents

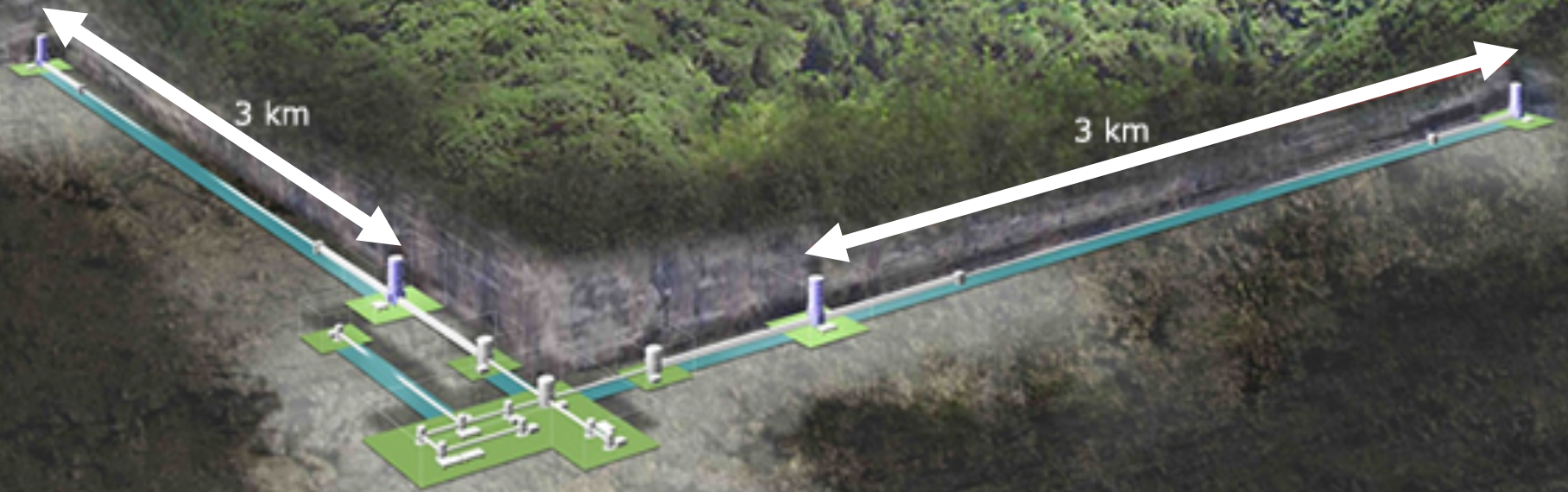
- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
 - 制御の目的
 - センサ・アクチュエータ
- ダンピング制御

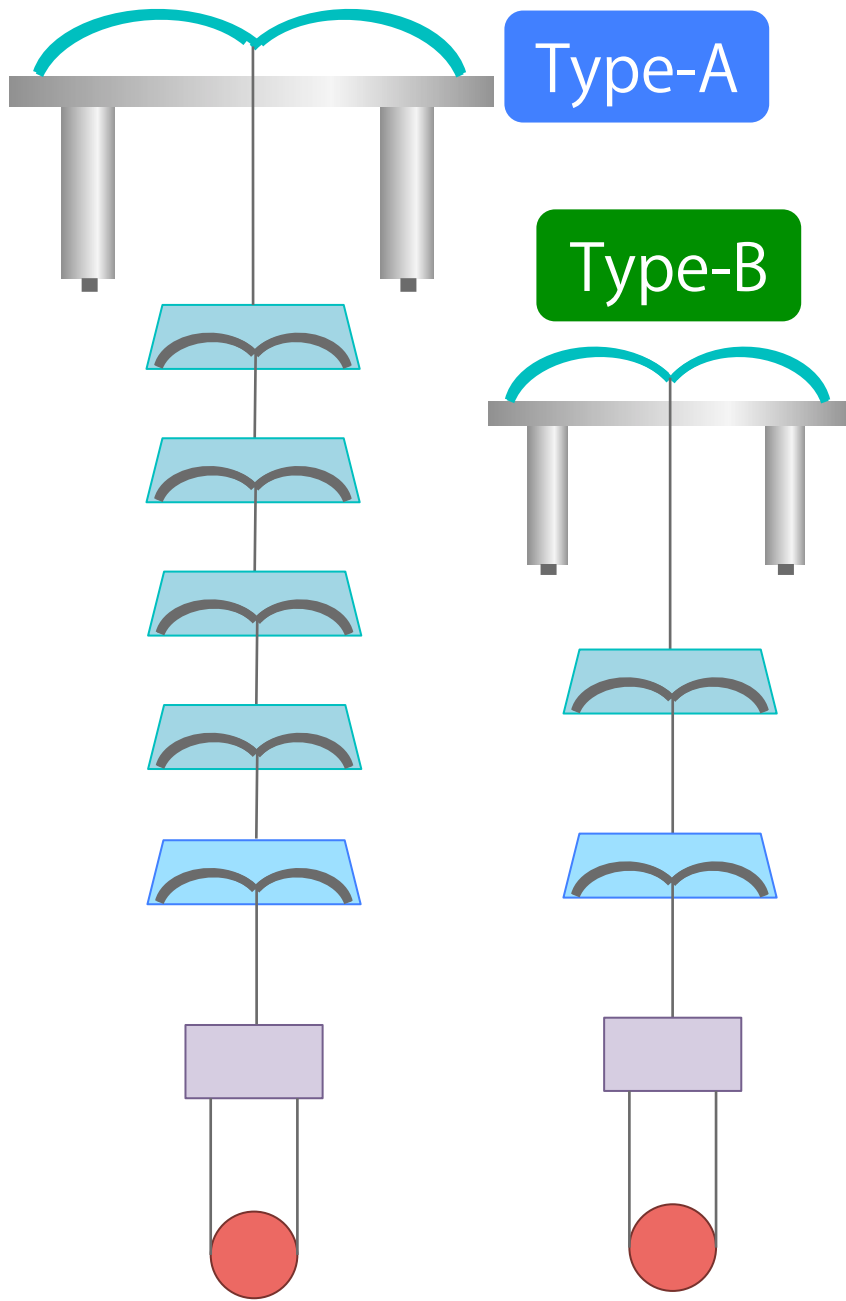
KAERA



KAGRA

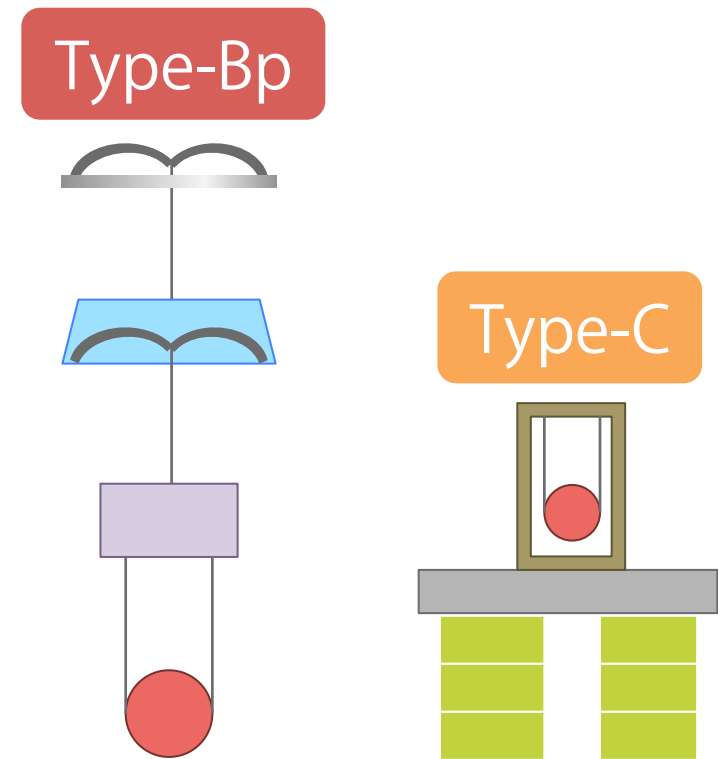
- Fabry-Perot Michelson型のレーザー干渉計
- 神岡鉱山の地下に建設
- 2015年度内に試運転を開始(iKAGRA)





KAGRA 鏡防振装置

Seismic Attenuation System



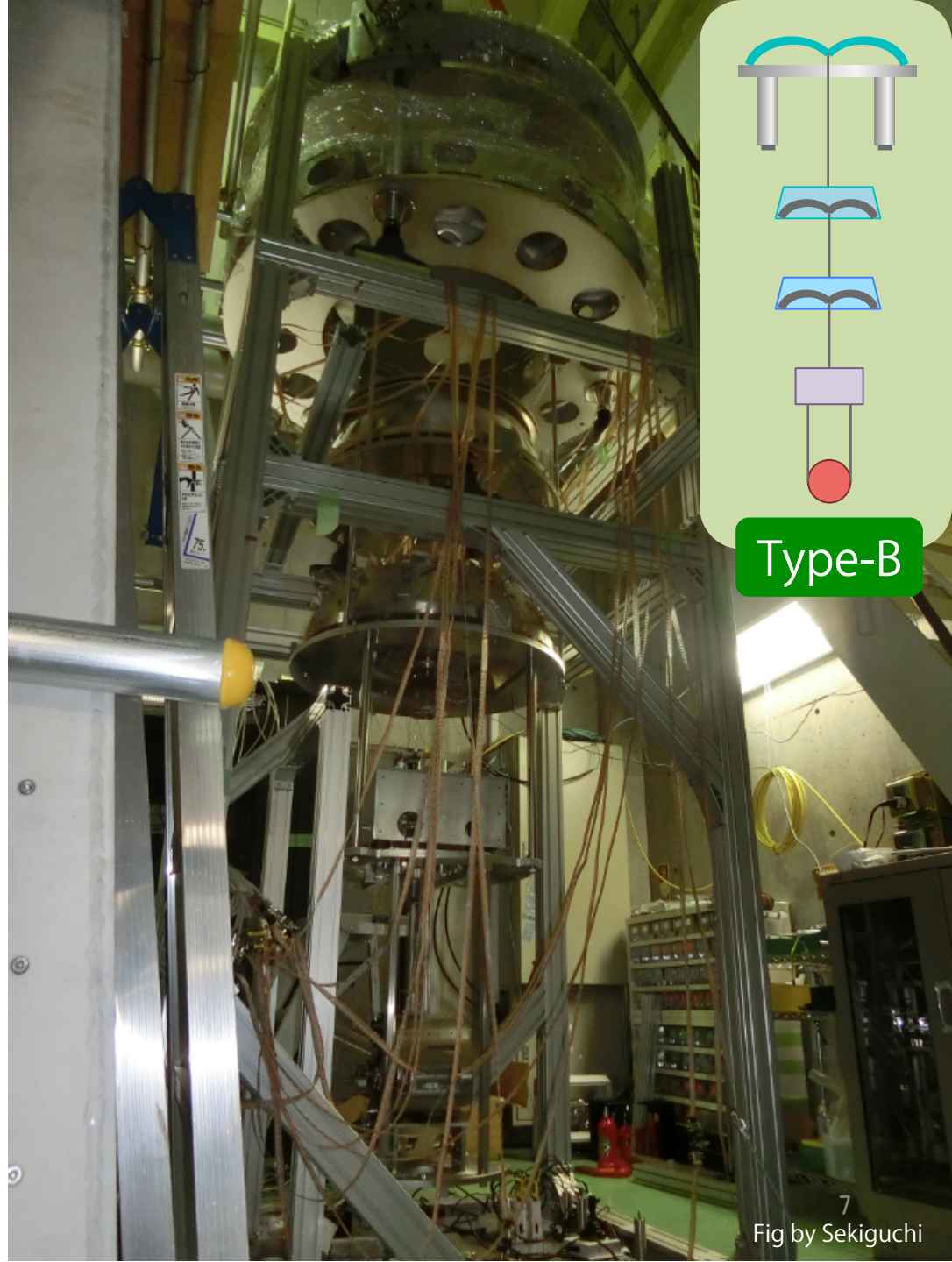
防振装置の試験

- ☑ Type-B SAS 単体での試験終了 (-2015.06)



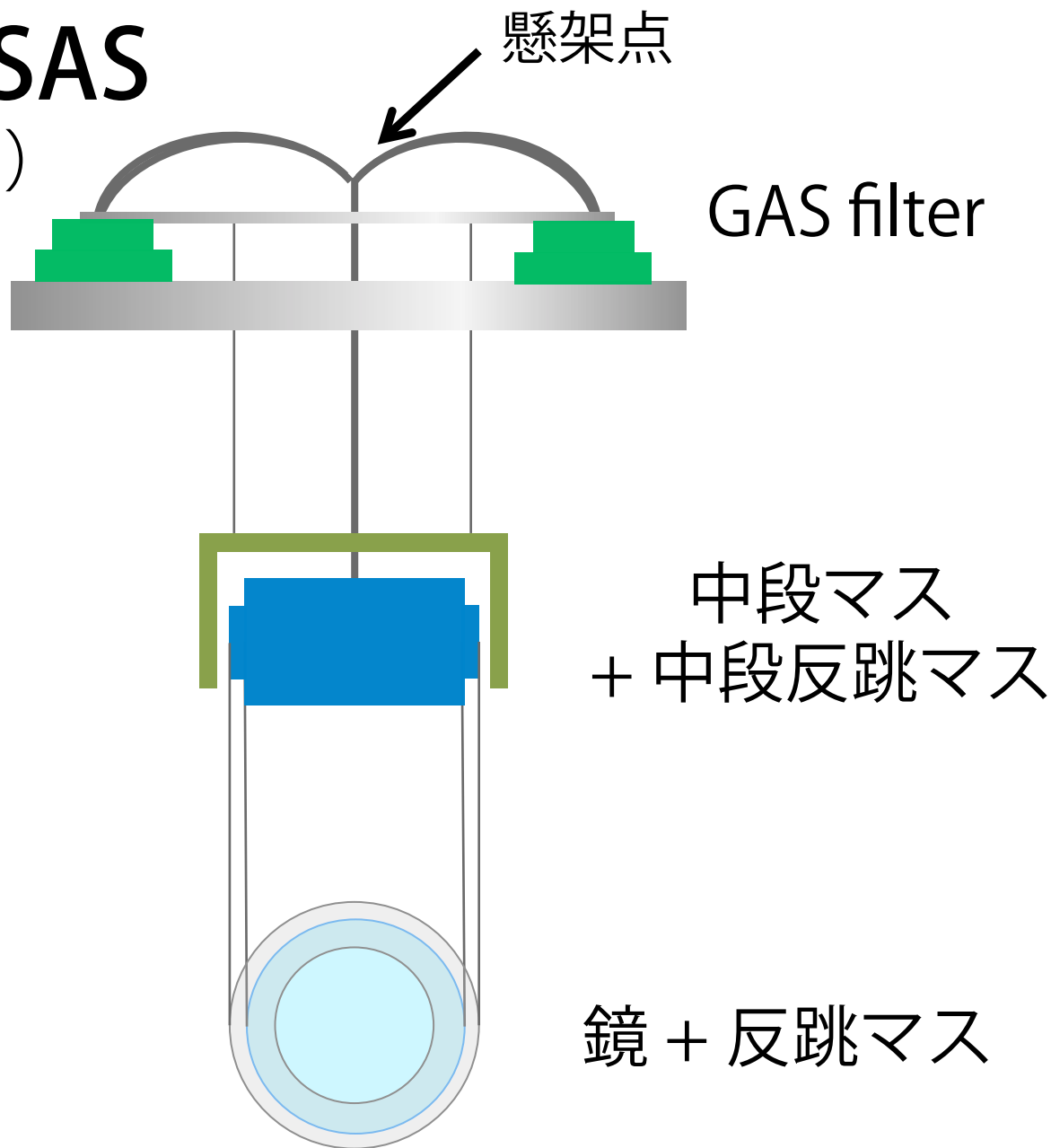
Next step:

- 防振装置を干渉計に組み込んだ試験

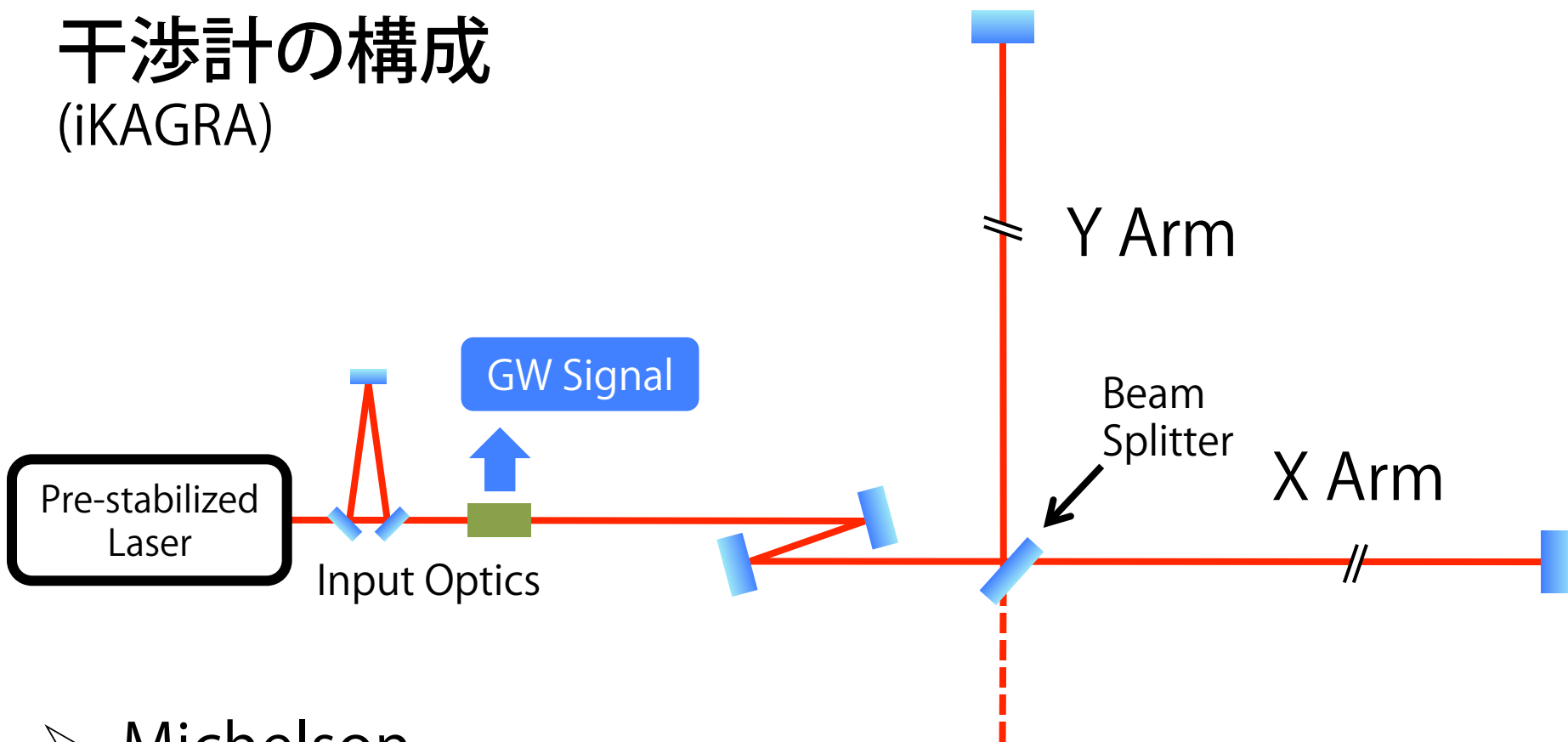


Type-Bp' SAS

(iKAGRA PR3)

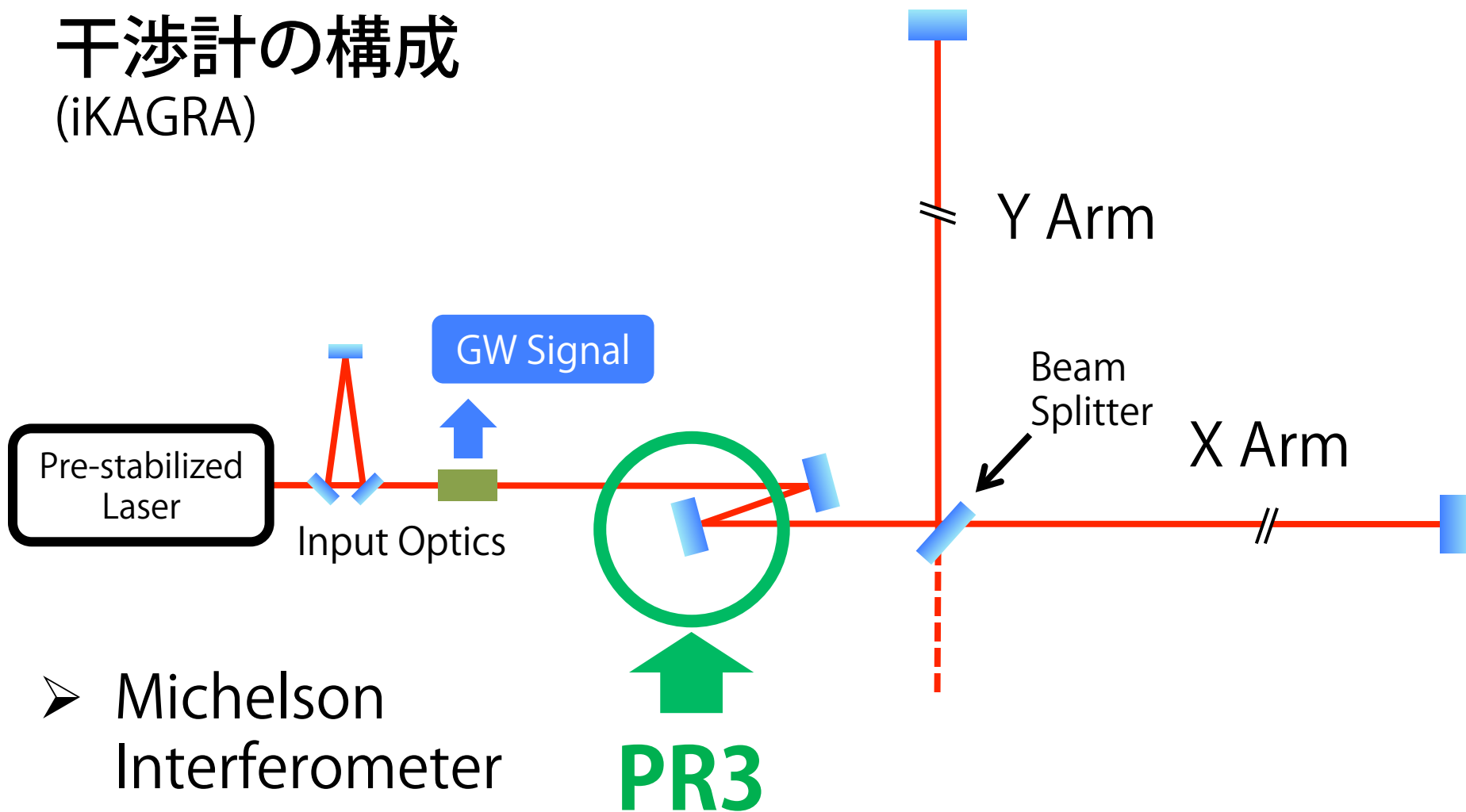


干渉計の構成 (iKAGRA)



- Michelson Interferometer

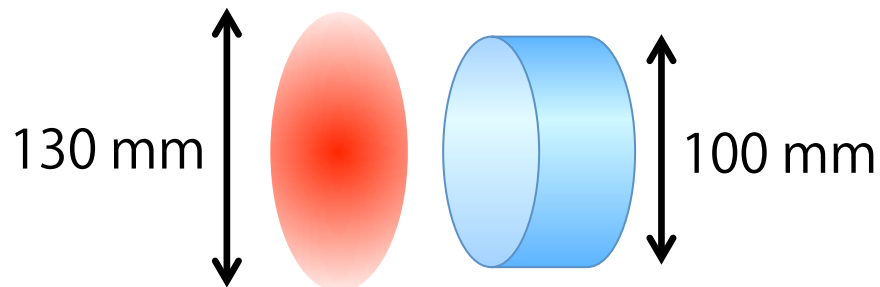
干渉計の構成 (iKAGRA)



➤ Michelson Interferometer

たとえば…

PR3鏡が $10 \mu\text{rad}$ 程度
揺れていると、3 km 先の
ビームスポットは 30 mm も
動いてしまう

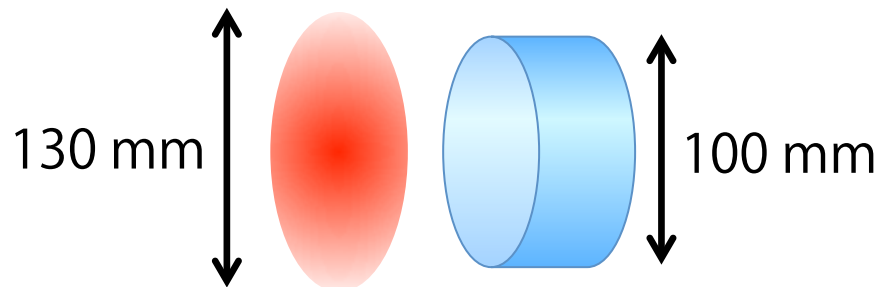


3 km先での
ビームスポット $\leq 1 \text{ mm}$ の揺れ \iff PR3 鏡の
角度揺れ $\leq 0.3 \mu\text{rad}$

iKAGRA における干渉計からの要求

たとえば…

PR3鏡が $10 \mu\text{rad}$ 程度
揺れていると、3 km 先の
ビームスポットは 30 mm も
動いてしまう



3 km先での
ビームスポット $\leq 1 \text{ mm}$
の揺れ

制御への要求

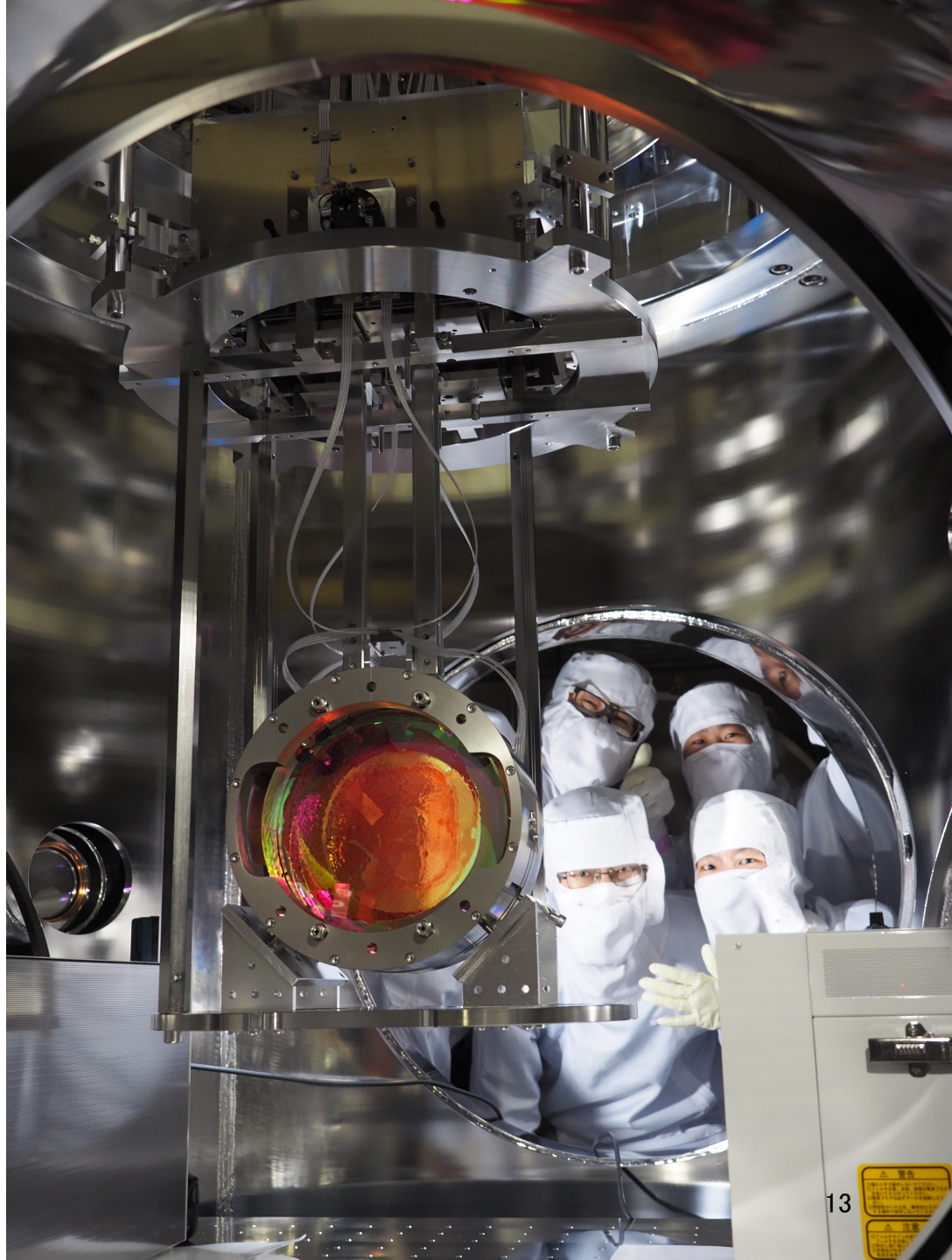
PR3 鏡の
角度揺れ $\leq 0.3 \mu\text{rad}$

ikAGRA における干渉計からの要求

Type-Bp' SAS Installation

2016.02.25

真空槽内への
インストール完了

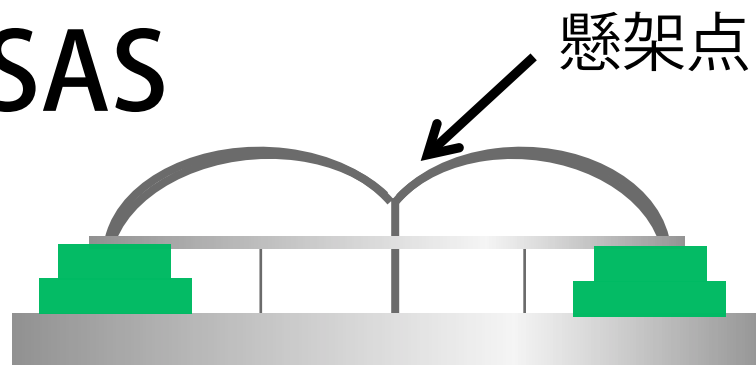


Contents

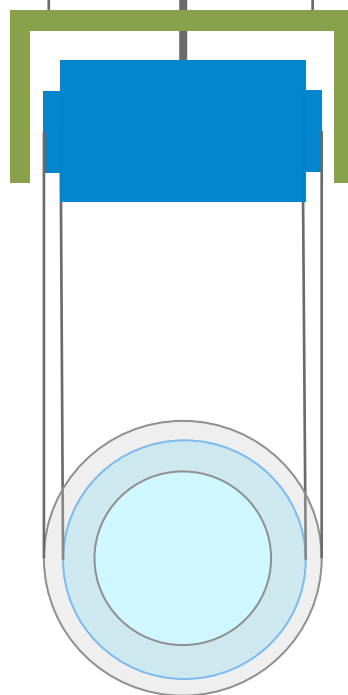
- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
 - 制御の目的
 - センサ・アクチュエータ
- ダンピング制御

Type-Bp' SAS

(Mass stage)



GAS filter

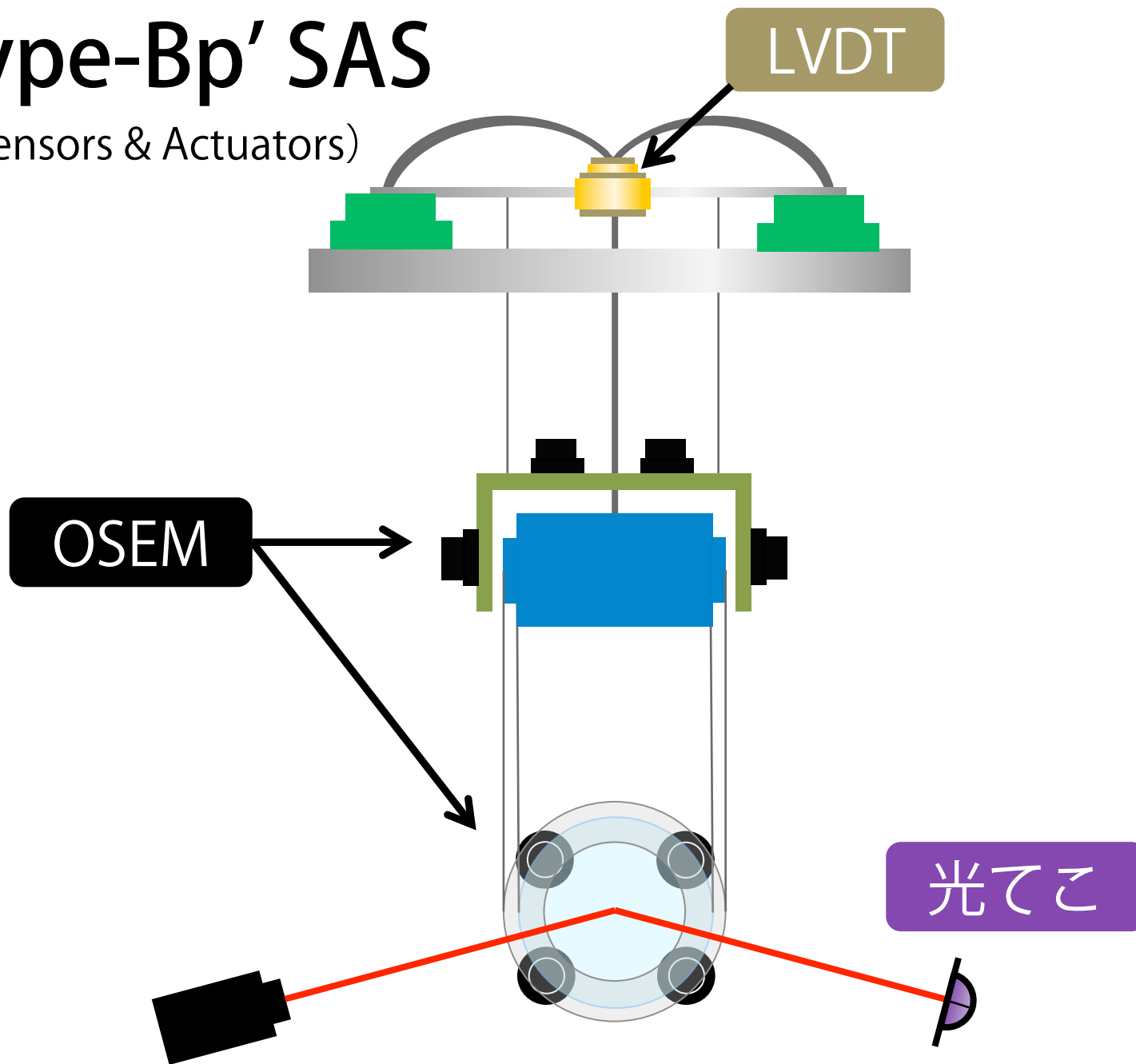


中段マス
+ 中段反跳マス

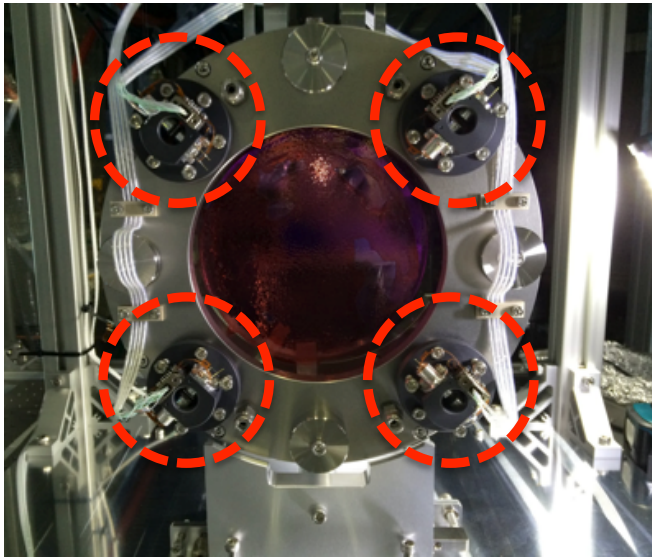
鏡 + 反跳マス

Type-Bp' SAS

(Sensors & Actuators)

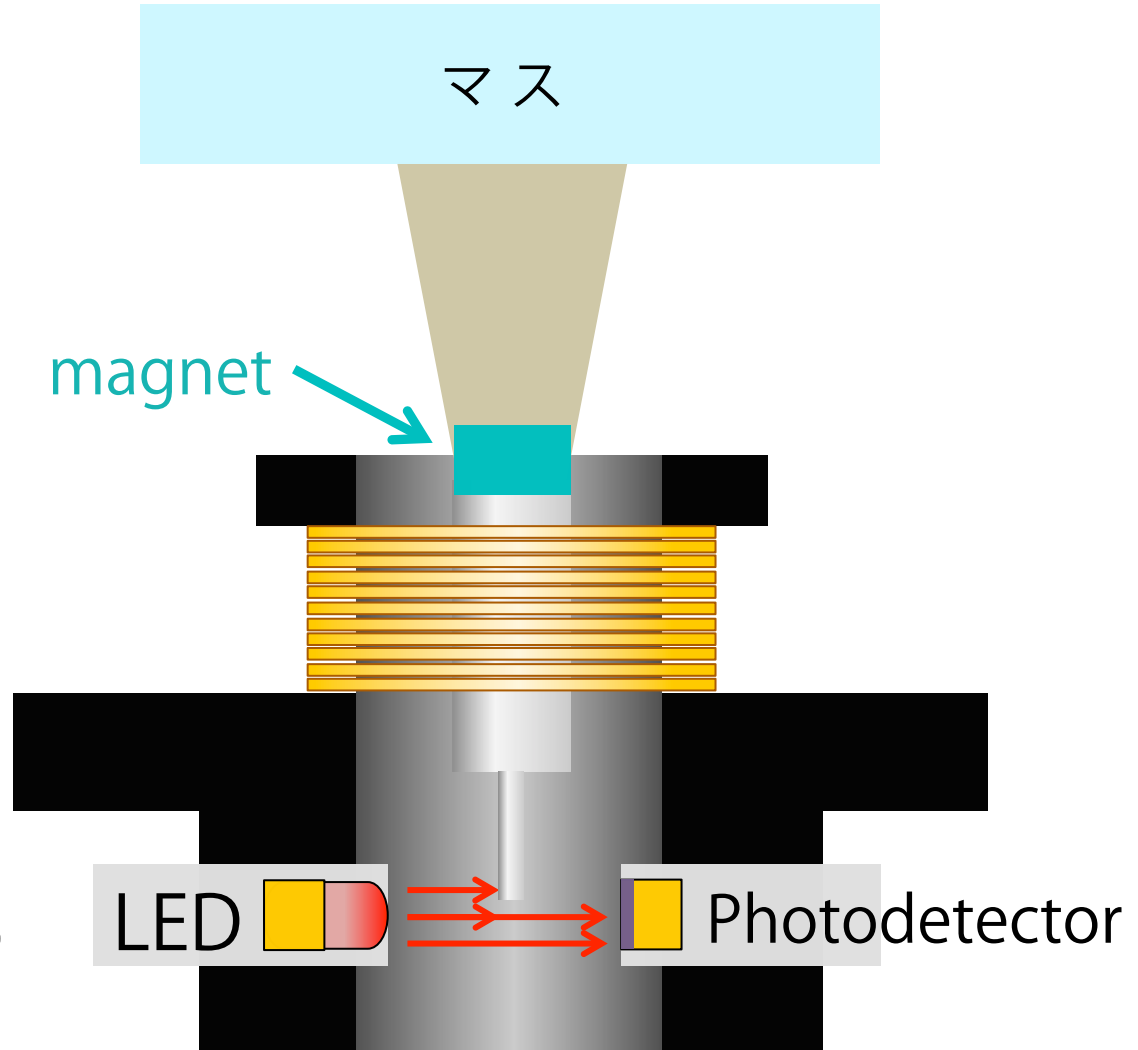


Optical Sensor and ElectroMagnet



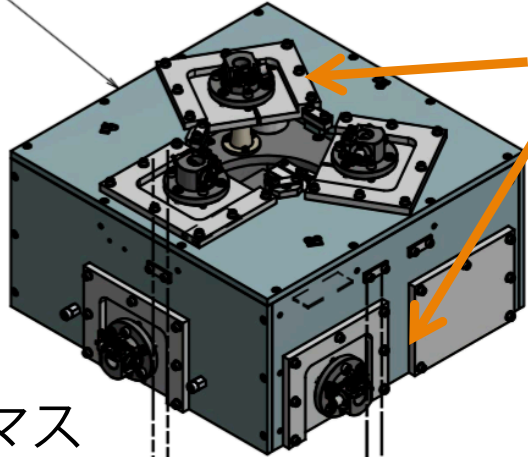
シャドー変位センサ
+
電磁力アクチュエータ

- マスー反跳マス間の
相対位置を制御

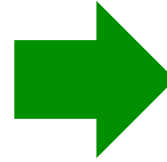


OSEMの配置

中段反跳マス



OSEM x6
- Vertical x3
- Horizontal x3

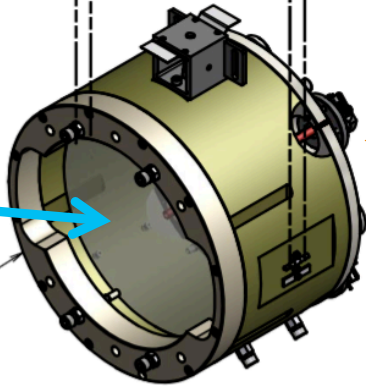


中段マス—中段反跳マス間
6自由度

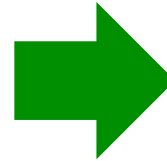
中段マス

鏡

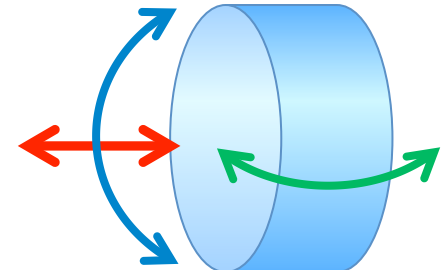
反跳マス



OSEM x4
(backside)

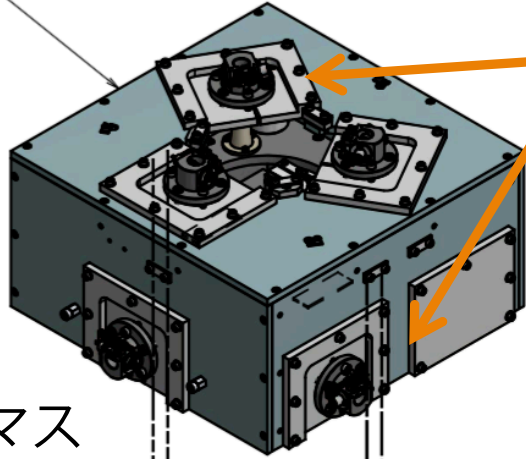


鏡—反跳マス間
3自由度

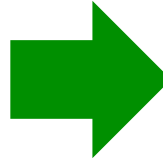


OSEMの配置

中段反跳マス

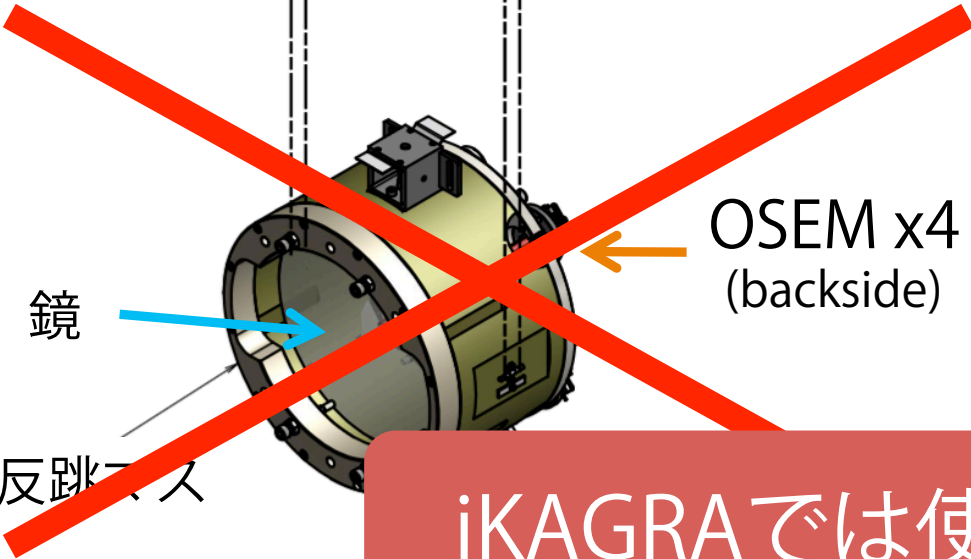


OSEM x6
- Vertical x3
- Horizontal x3

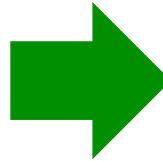


中段マスー中段反跳マス 間
6自由度

中段マス

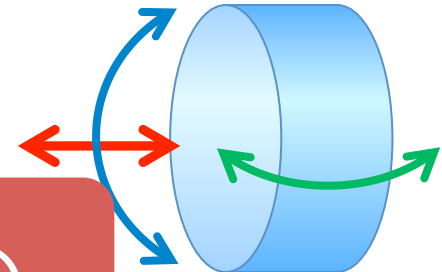


OSEM x4
(backside)



鏡ー反跳マス 間

固定



iKAGRAでは使わない

Type-Bp' SAS

(Sensors & Actuators)

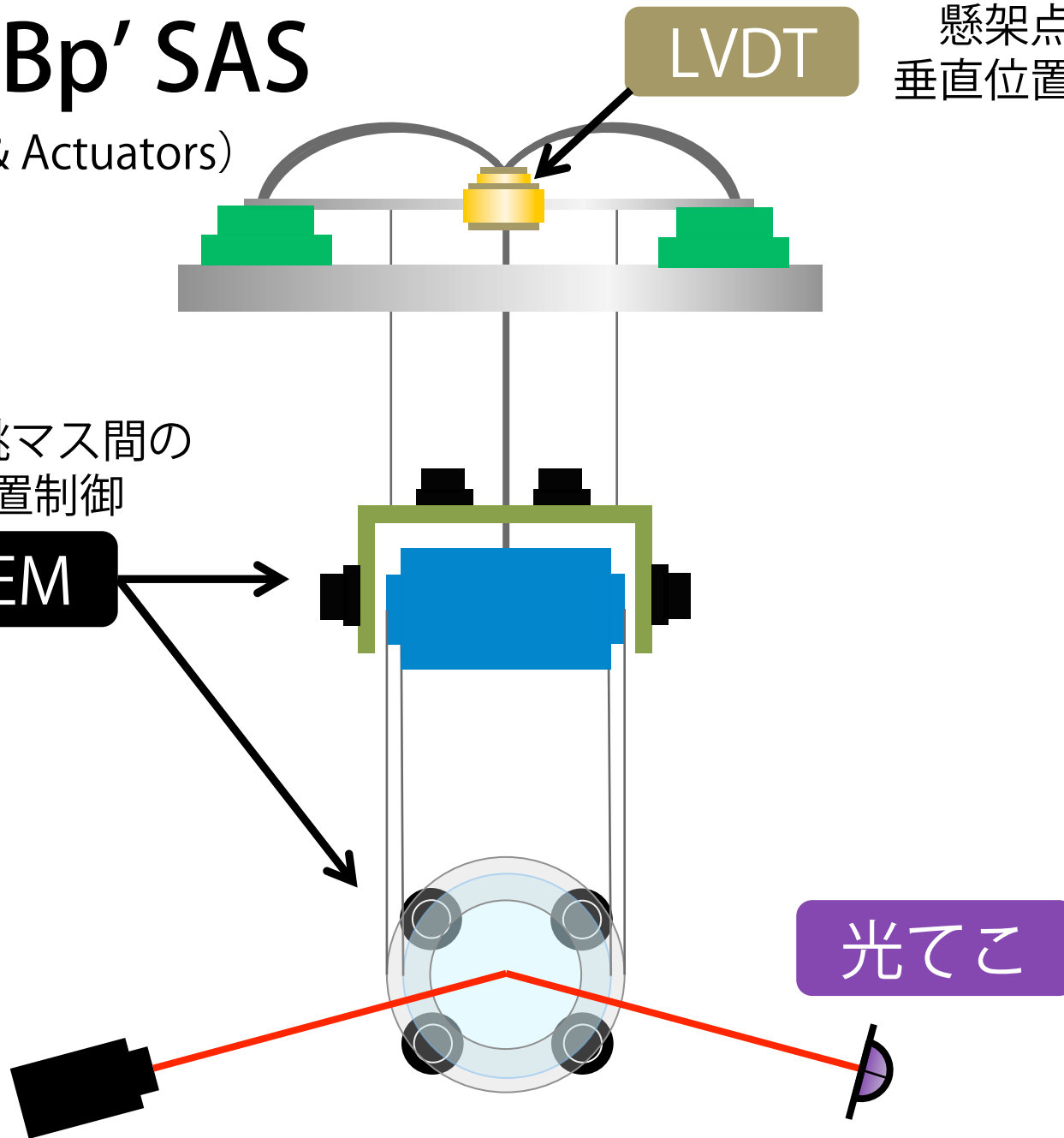
LVDT

懸架点の
垂直位置制御

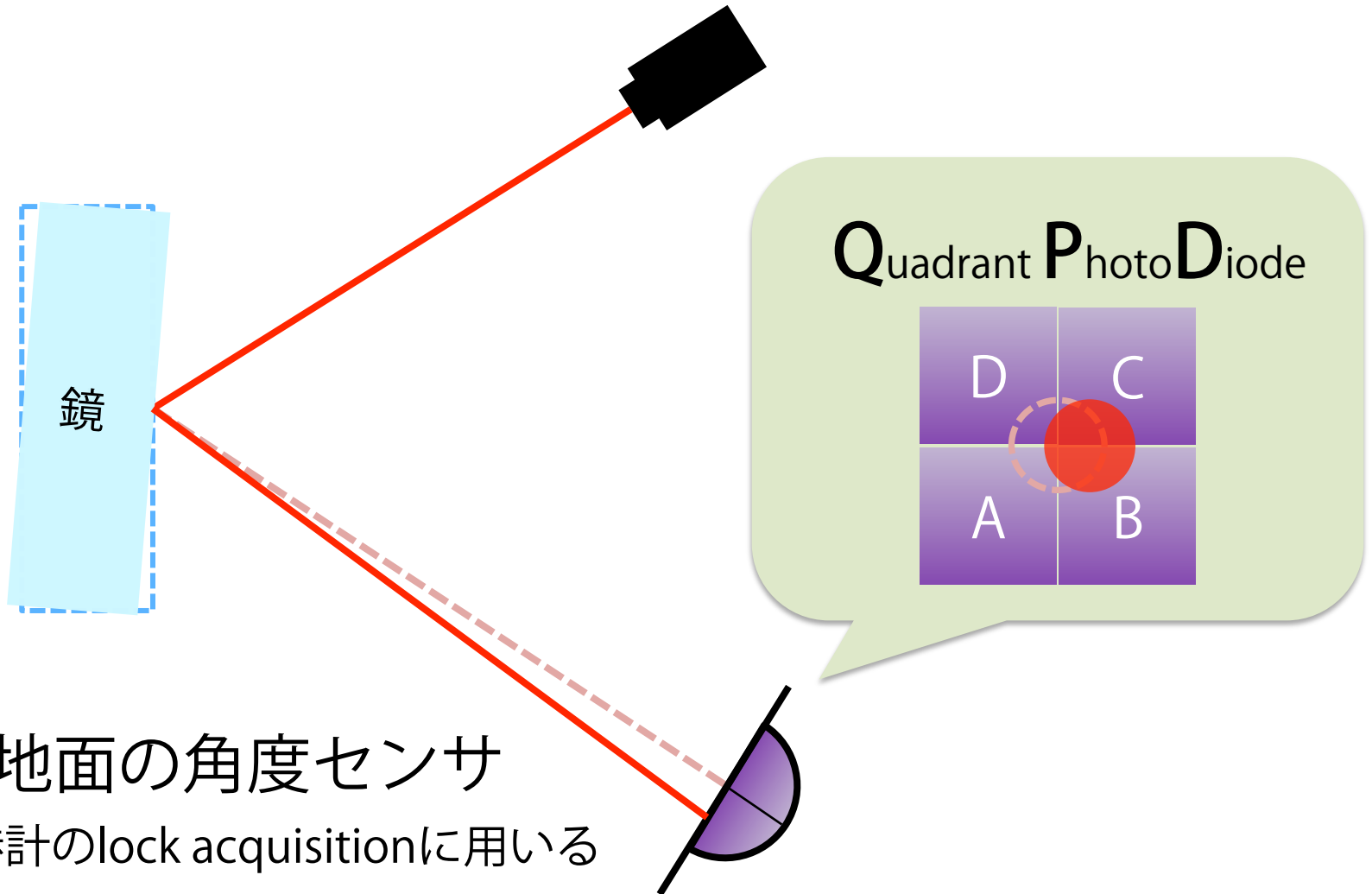
マスー反跳マス間の
相対位置制御

OSEM

光てこ



光てこ (Optical Lever)

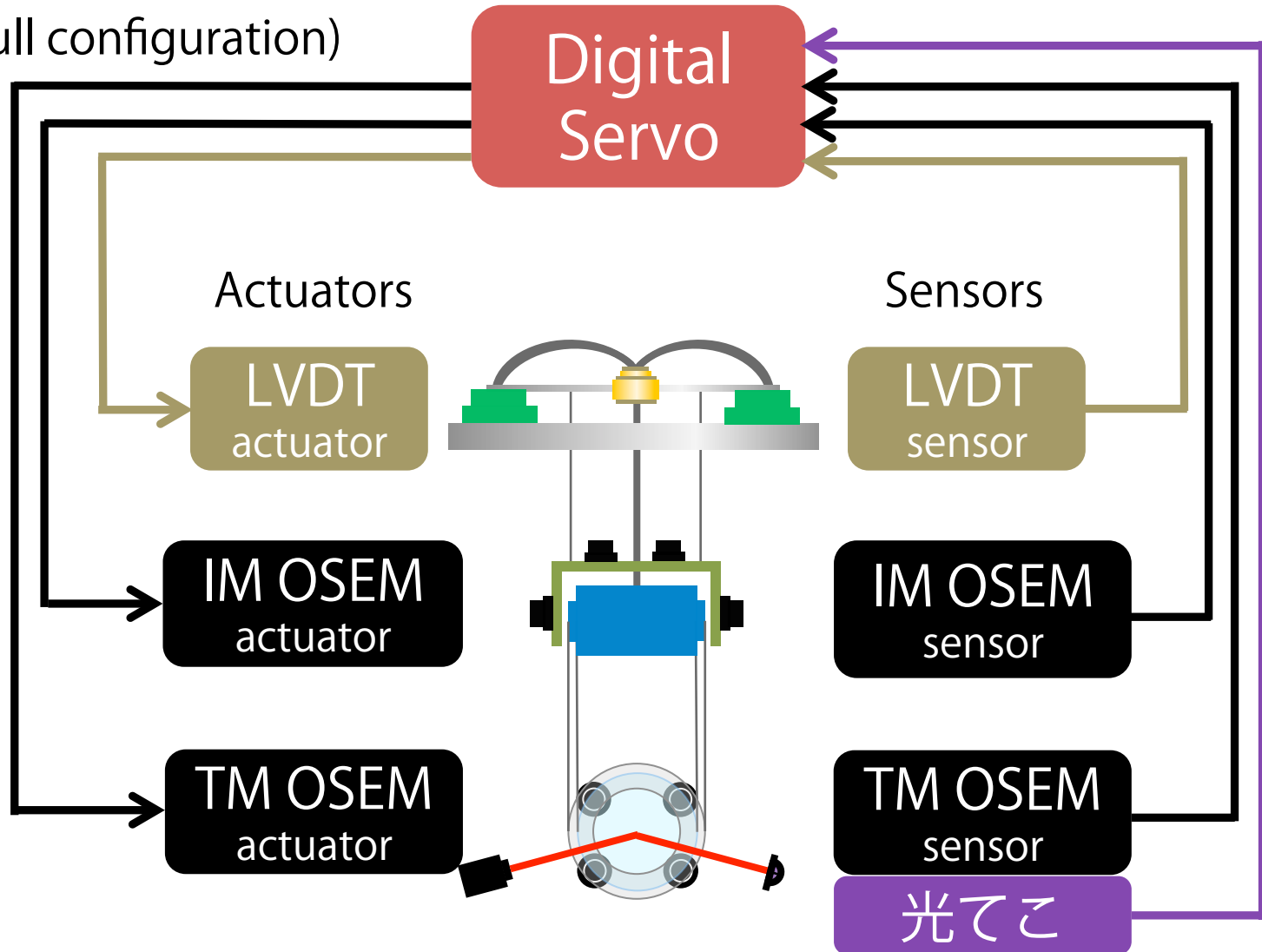


鏡 — 地面の角度センサ

- 干渉計のlock acquisitionに用いる

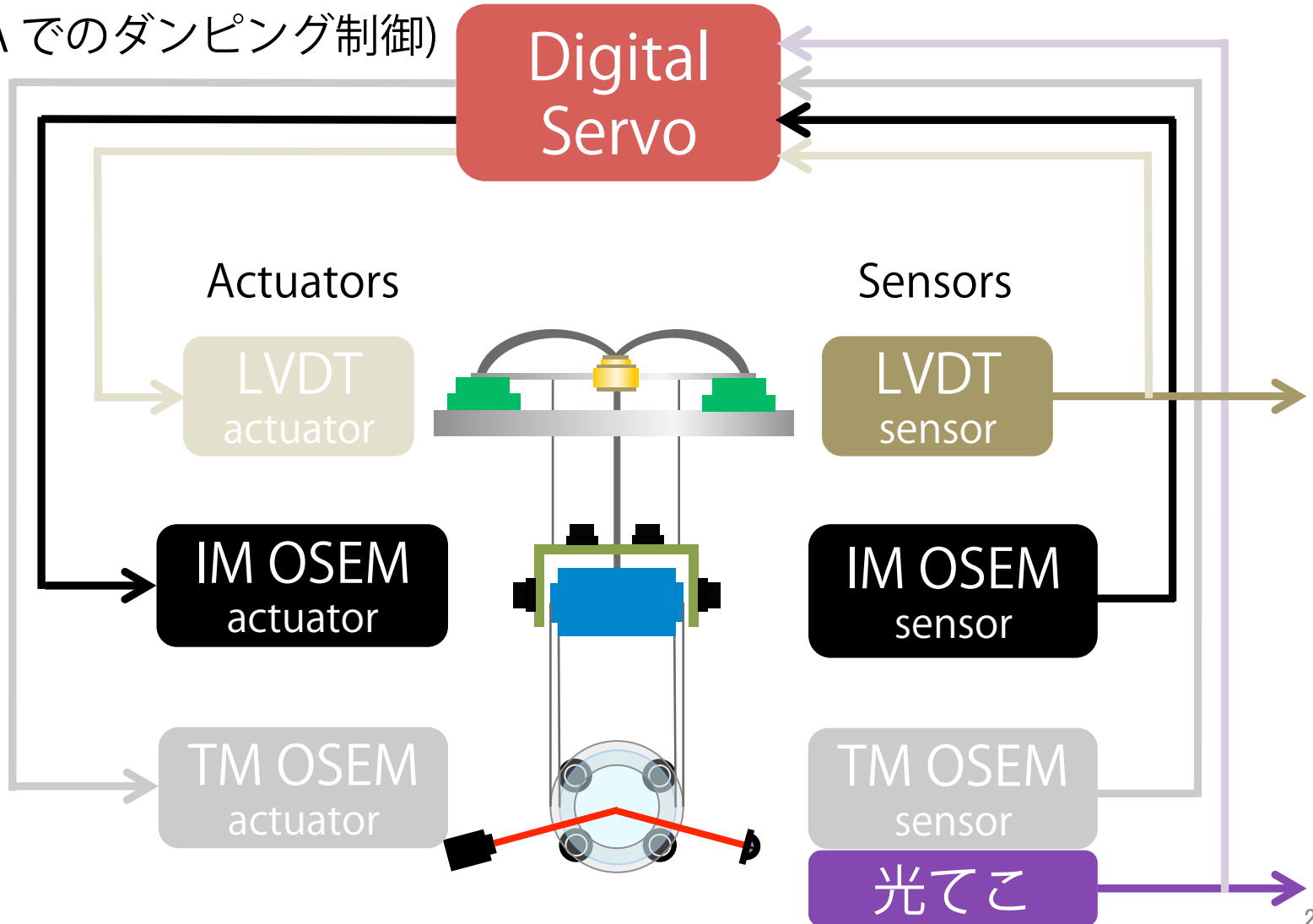
ローカル制御ループ

(Full configuration)



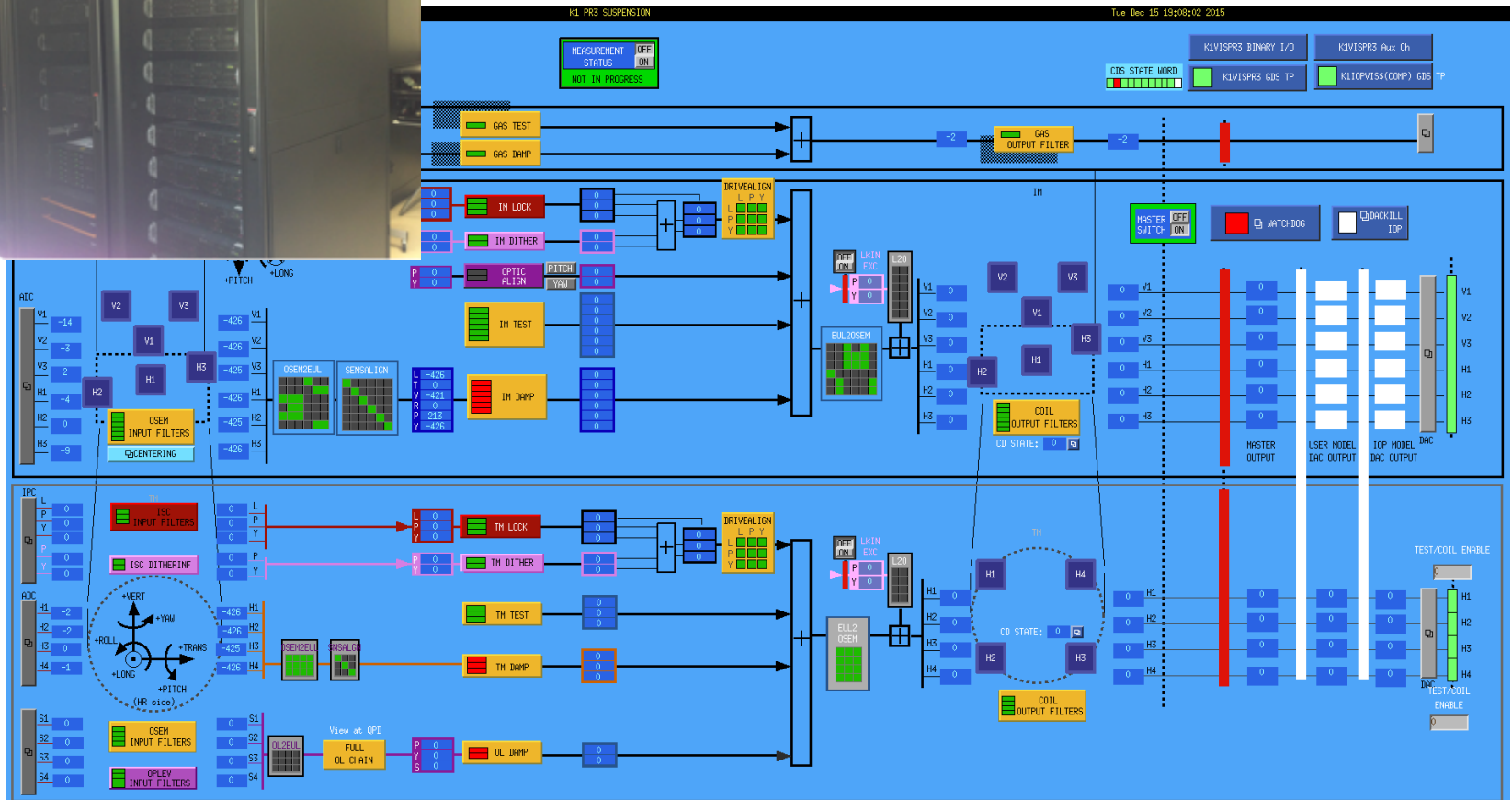
ローカル制御ループ

(iKAGRA でのダンピング制御)



Real Time Control System

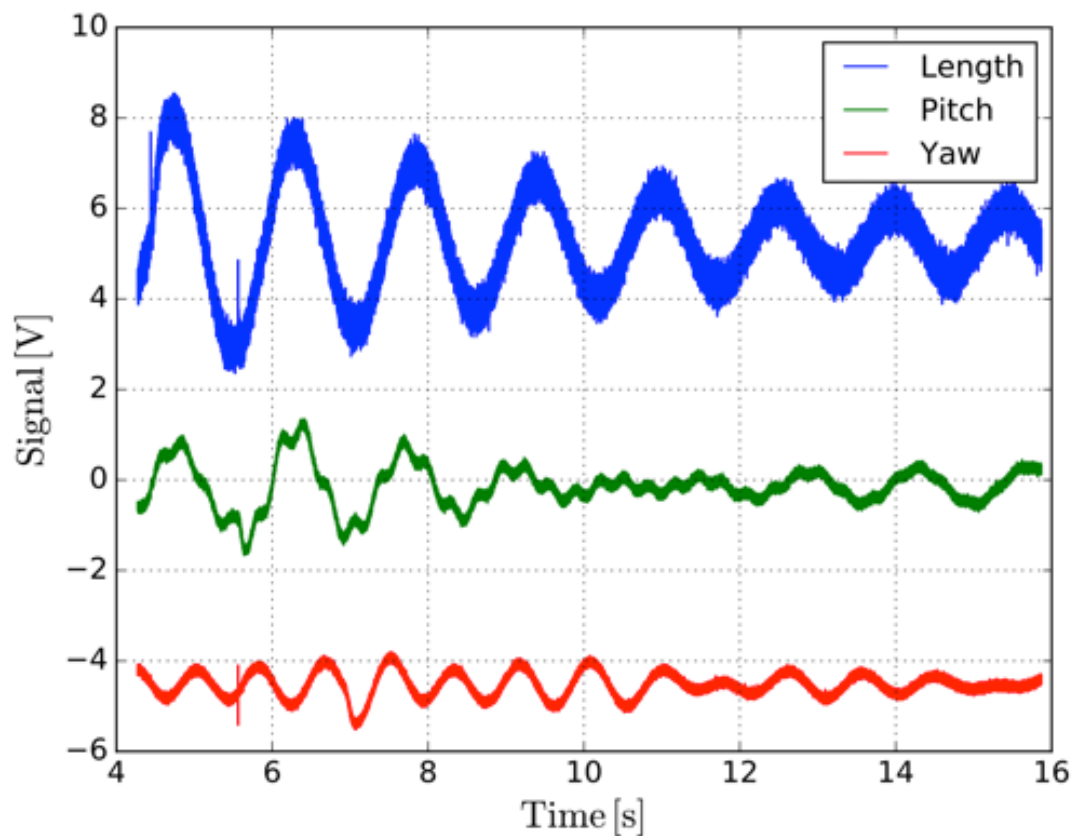
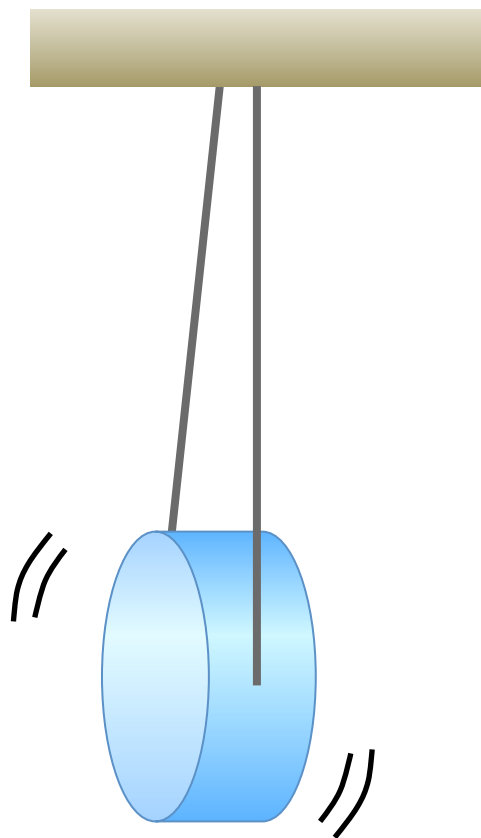
デジタルシステム内でフィルタを実装



Contents

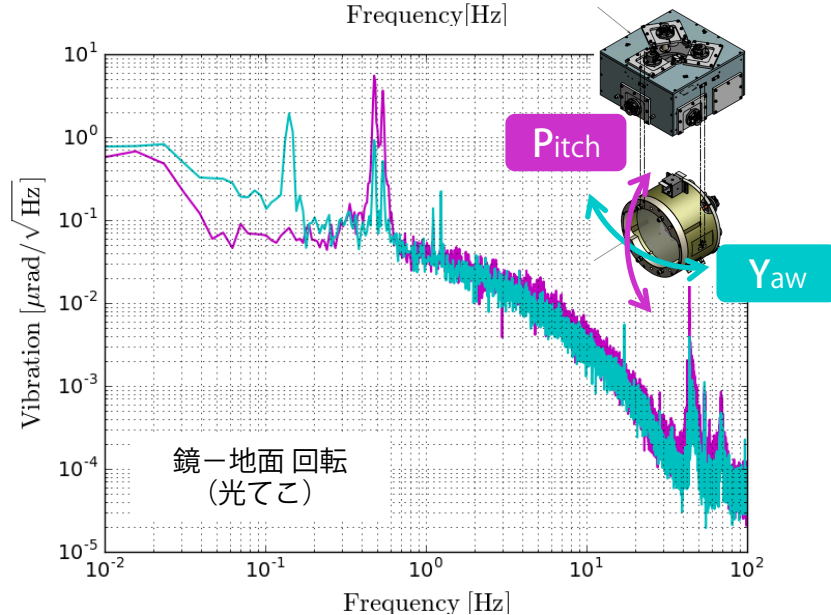
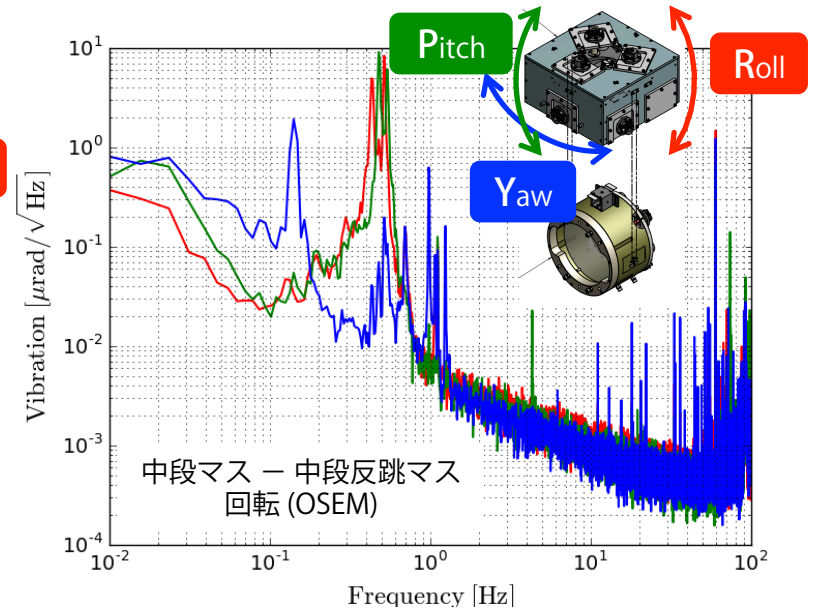
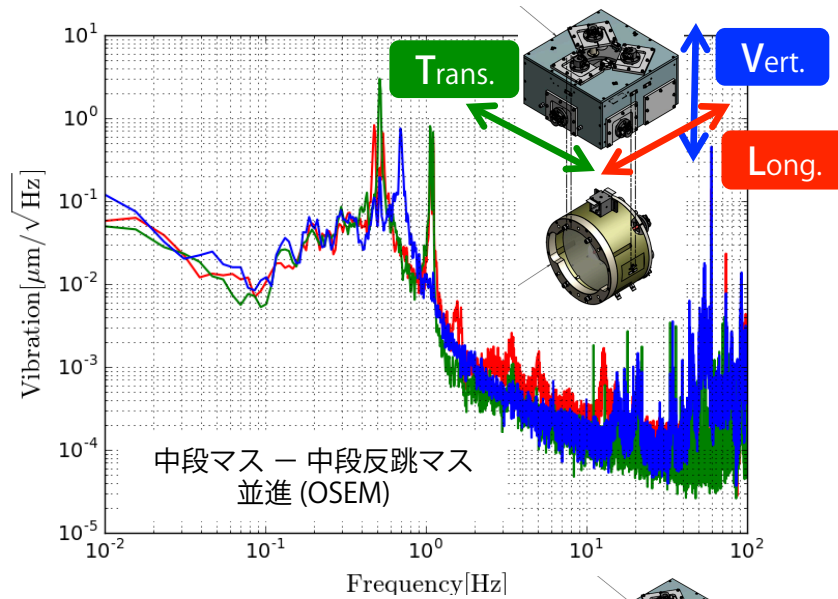
- PR3鏡防振装置：Type-Bp' SAS
 - 制御の目的
 - センサ・アクチュエータ
- **ダンピング制御**

ダンピング制御



共振周波数での振り子の揺れを抑制する

振動スペクトルの測定

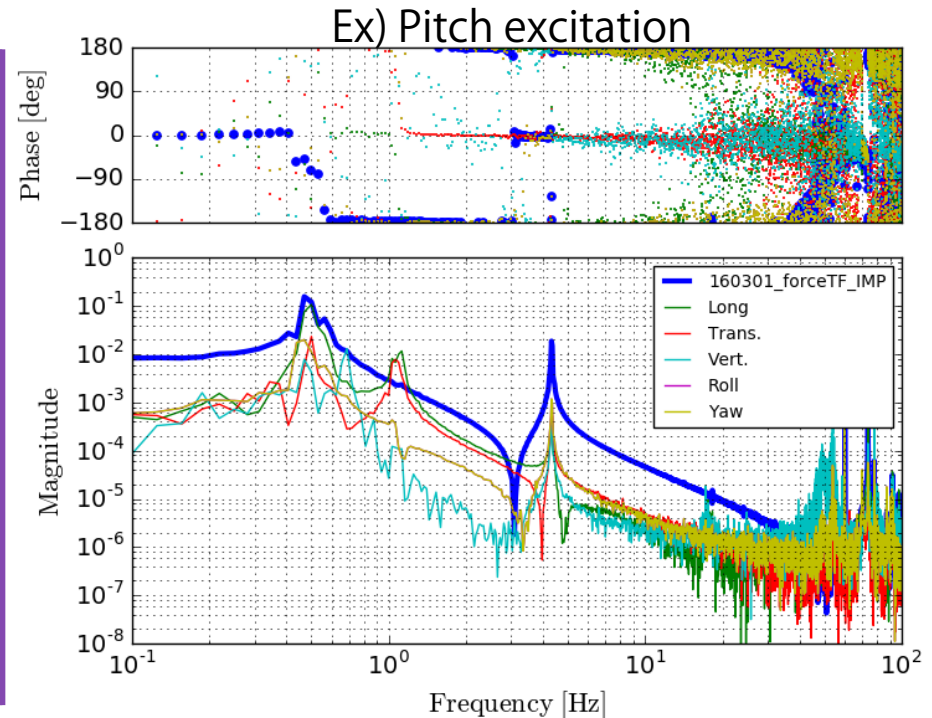
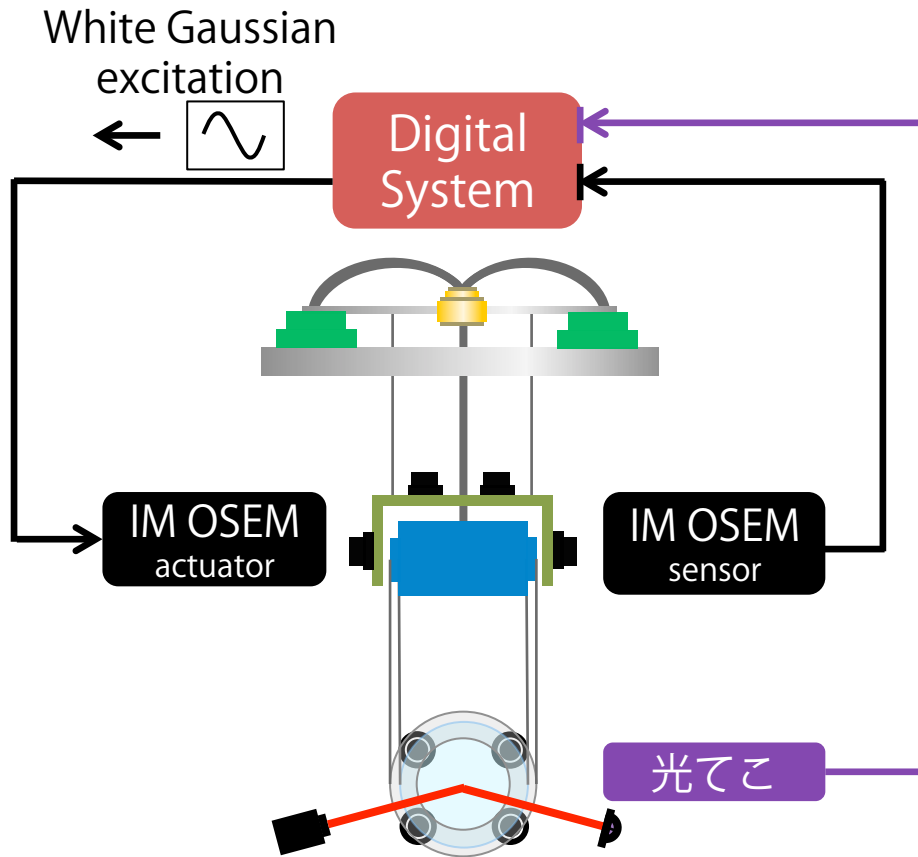


ダンピング制御

||

共振のピークを潰すこと

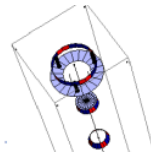
力変位伝達関数の測定



カップリングが大きい
対角化が必要 → 今後の課題

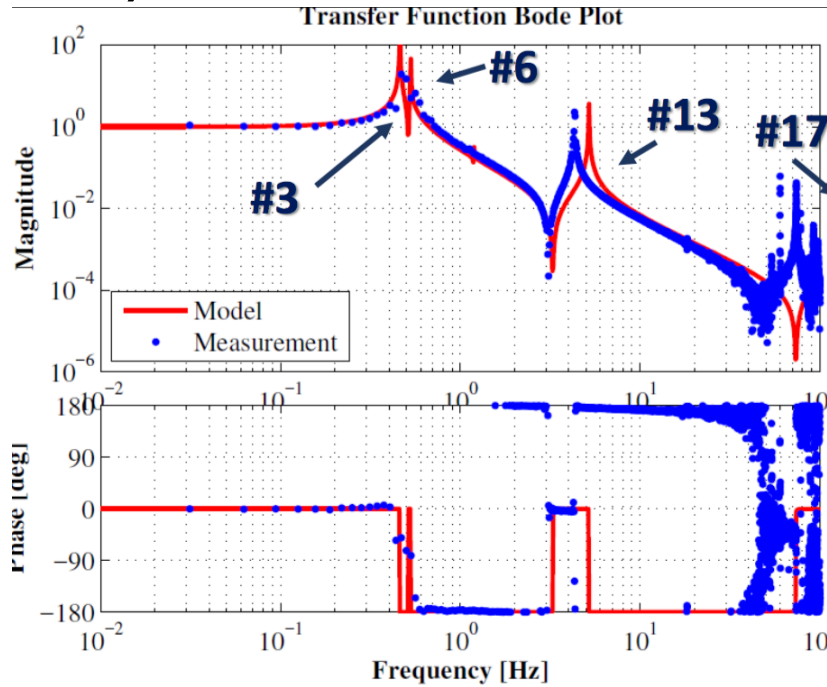
モデルとの比較

SUMCON in *Mathematica*
 suspension odel structur



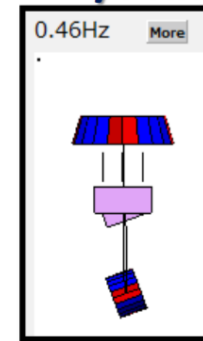
Developed by T. Sekiguchi

Ex) IM OSEM Pitch / Act. Pitch

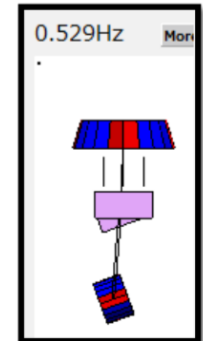


Simulated by Y. Fujii

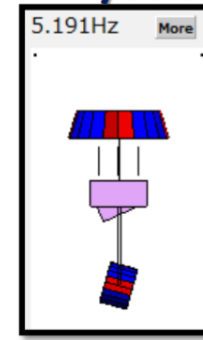
#3 : PIM
/PRM



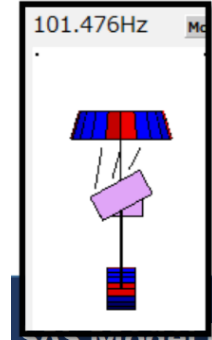
#6 : PIM
/PRM



#13 : PIM
/PRM

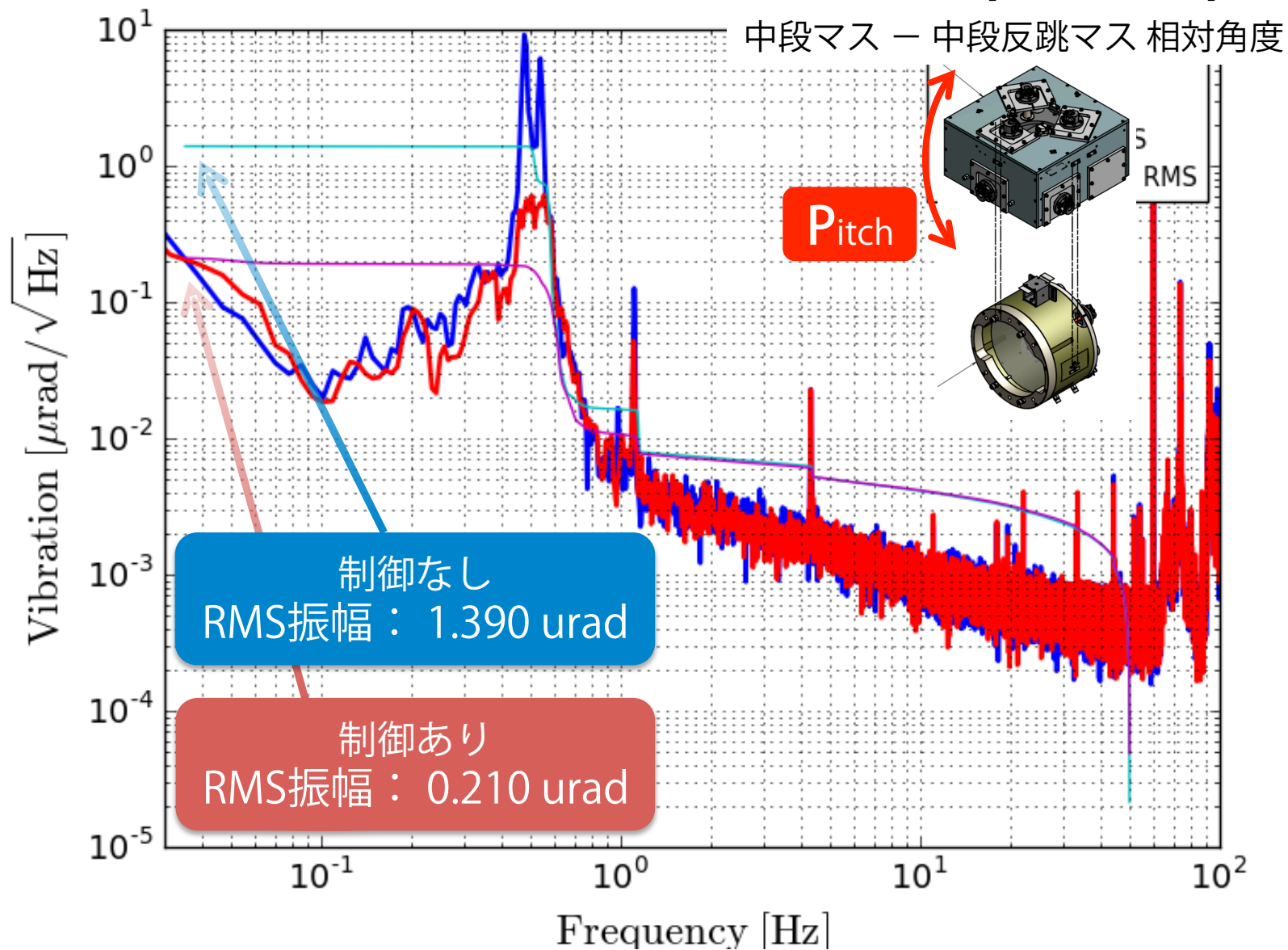


#17 : PIR

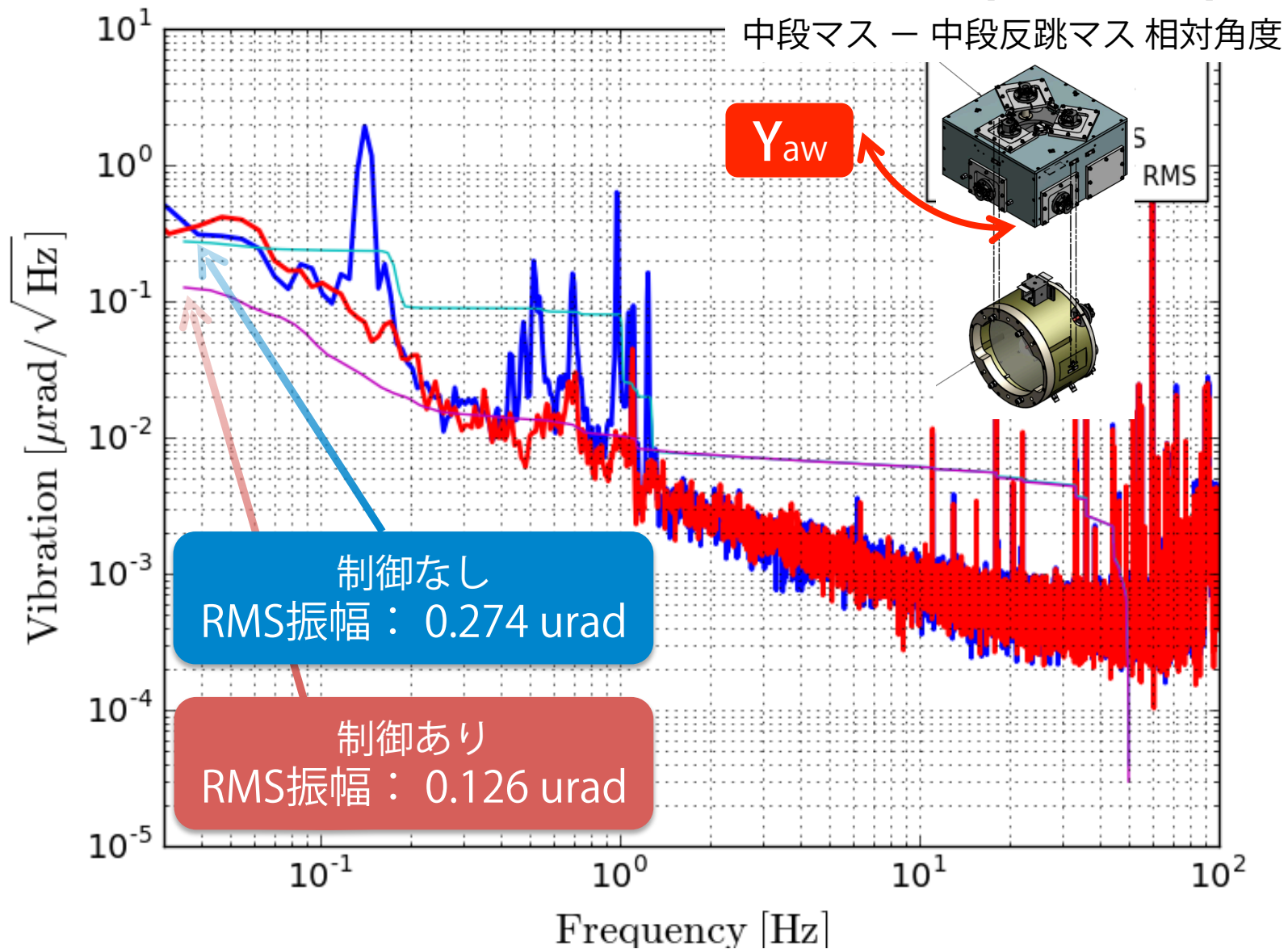


固有モードの特定、正しく懸架されているかを確認

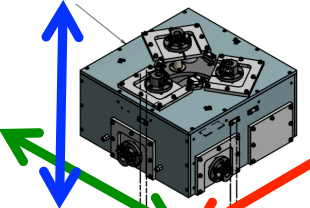
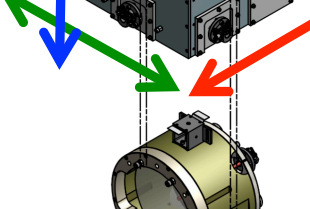
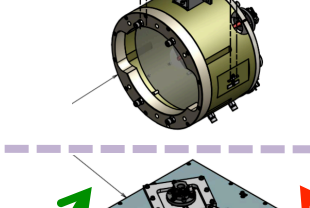
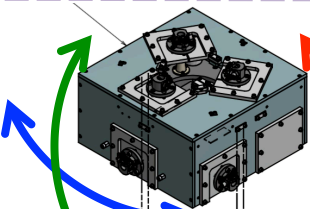
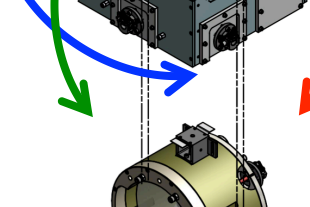
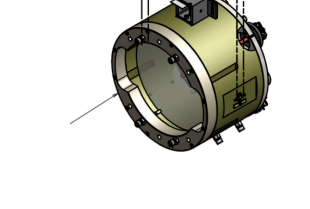
制御時の振動スペクトル(OSEM)



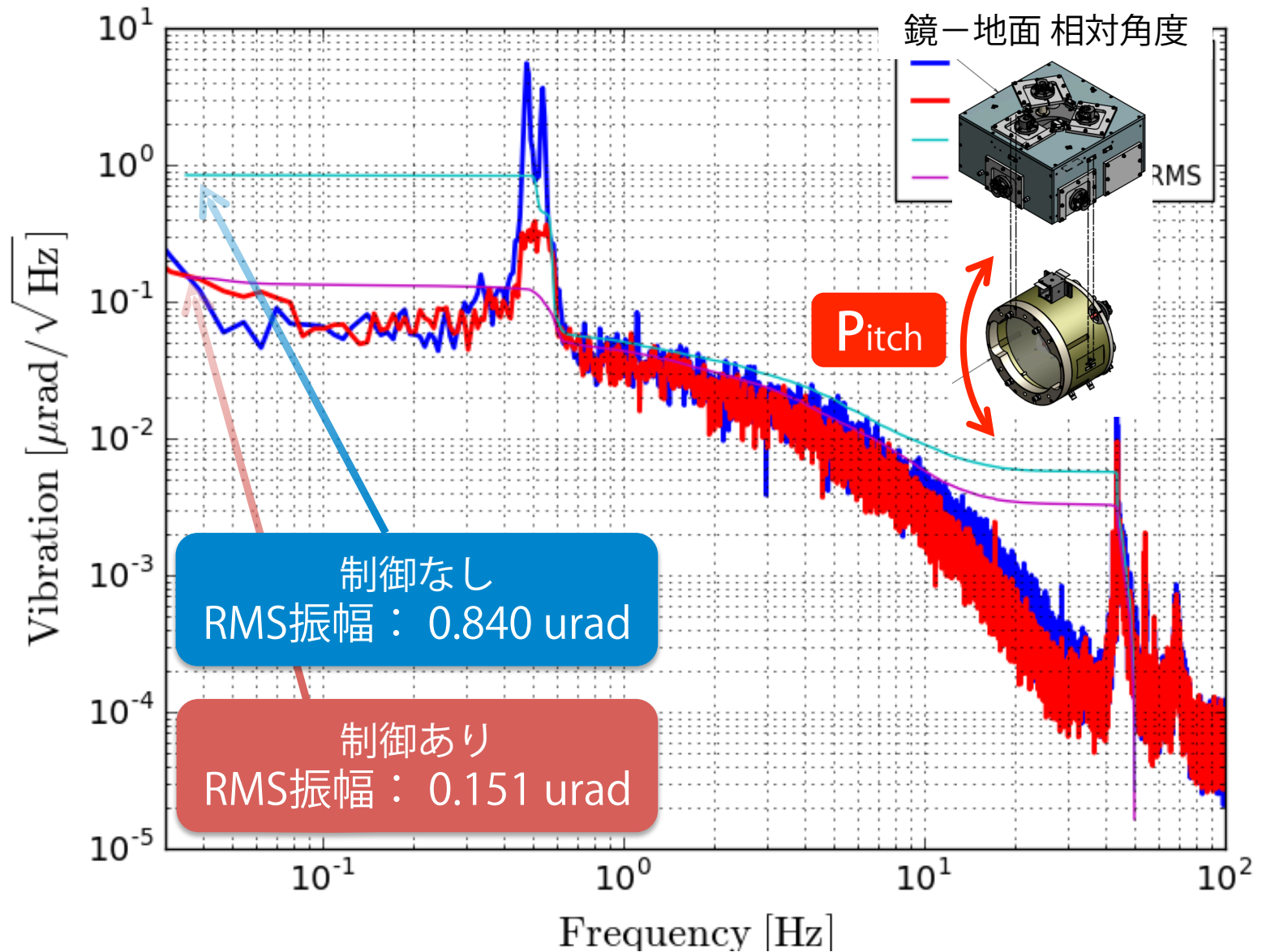
制御時の振動スペクトル(OSEM)



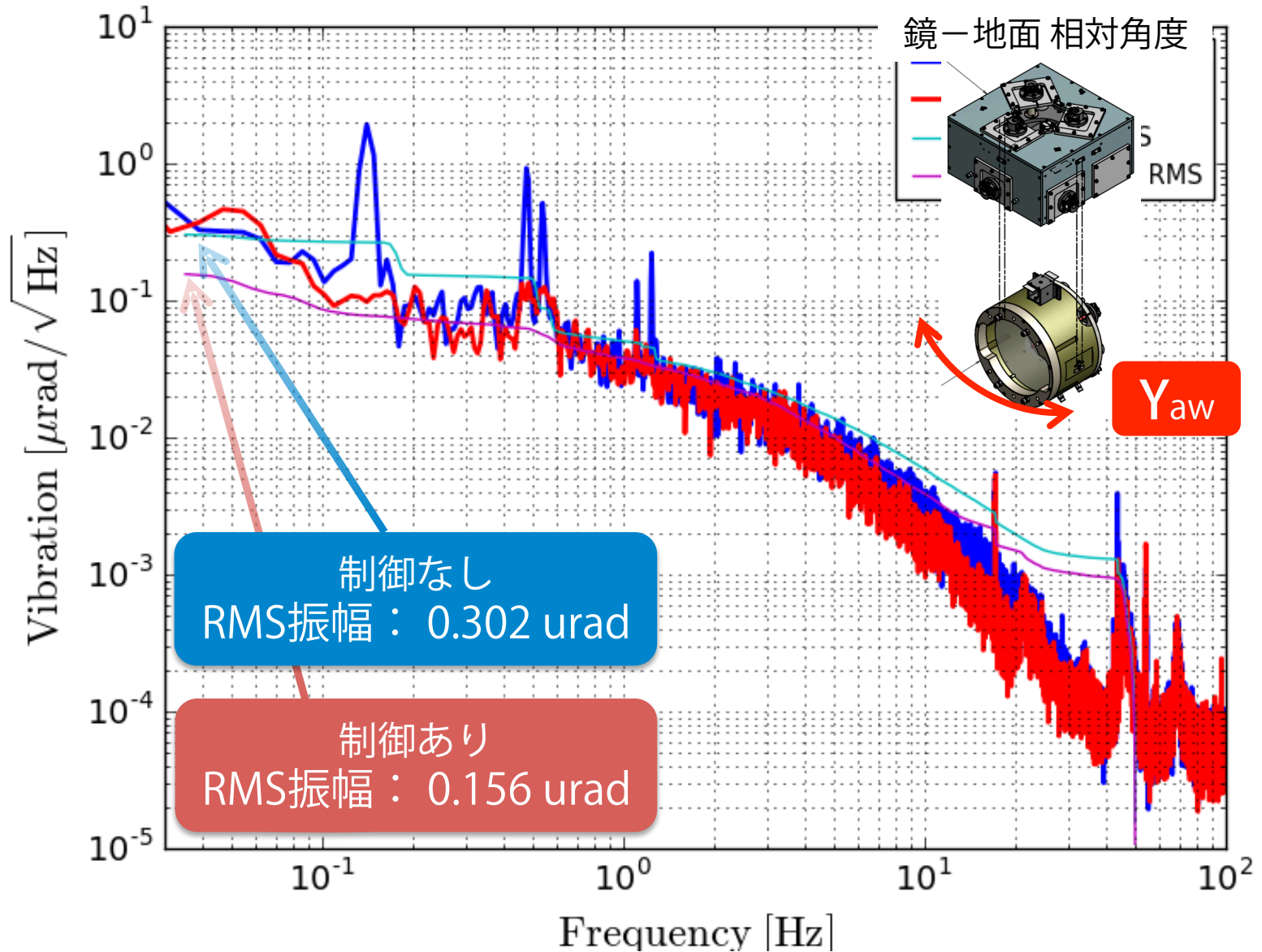
ダンピング制御による振動低減

中段マスー 中段反跳マス間	制御なしRMS	制御ありRMS
 <div data-bbox="465 468 633 554">Long.</div>	0.175 μm	0.026 μm
 <div data-bbox="465 606 633 692">Trans.</div>	0.374 μm	0.025 μm
 <div data-bbox="465 745 633 831">Vert.</div>	0.126 μm	0.051 μm
 <div data-bbox="465 896 633 982">Roll</div>	1.217 urad	0.091 urad
 <div data-bbox="465 1035 633 1120">Pitch</div>	1.390 urad	0.210 urad
 <div data-bbox="465 1173 633 1259">Yaw</div>	0.274 urad	0.126 urad

制御時の振動スペクトル (光てこ)



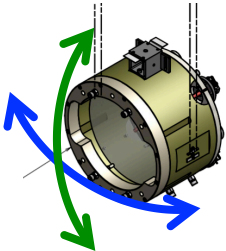
制御時の振動スペクトル (光てこ)



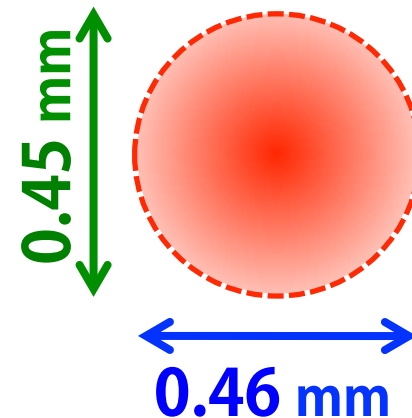
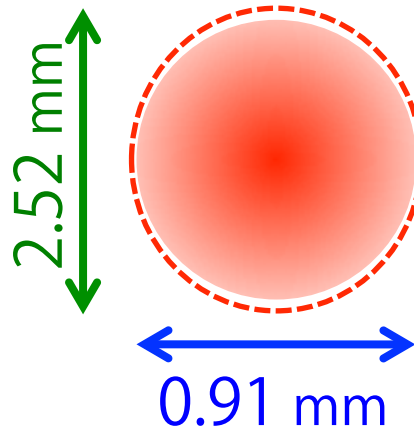
制御への要求

PR3 鏡の
角度揺れ $\leq 0.3 \mu\text{rad}$

要求を満たす
制御を達成した

鏡-地面間	制御なしRMS	制御ありRMS
	Pitch 0.840 urad	0.151 urad
	Yaw 0.302 urad	0.156 urad

3 km 先での
ビームスポット
の揺れ



まとめ

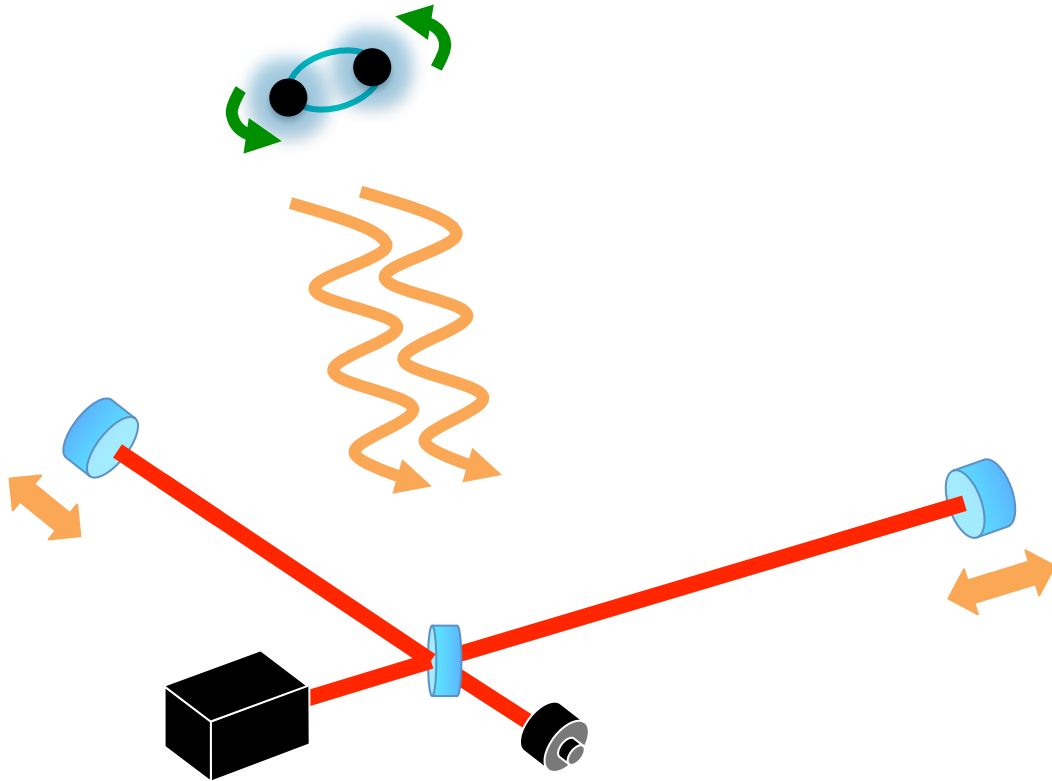
- Type-Bp' SASを干渉計に組み込み、要求を満たすダンピング制御を達成した

bKAGRAに向けて…

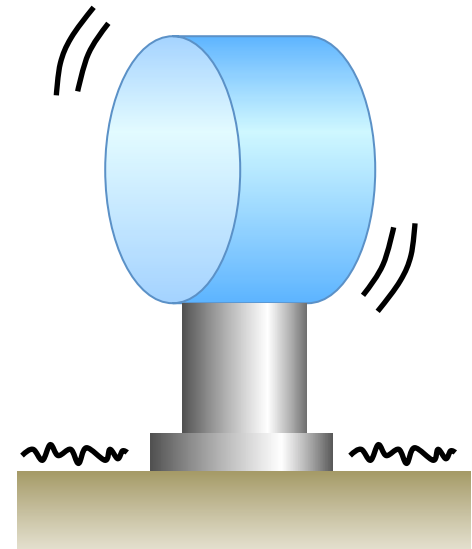
- 細かなチューニング作業
 - 鏡OSEMの修理
 - 制御系の対角化
 - Simulationによるデザインの改良 etc...
- Type-Bp' で得られた知見のフィードバック
 - Type-B, Type-Aデザインのマイナーチェンジ
 - インストール手順の改良 etc...

Backup Slides

地面振動雑音



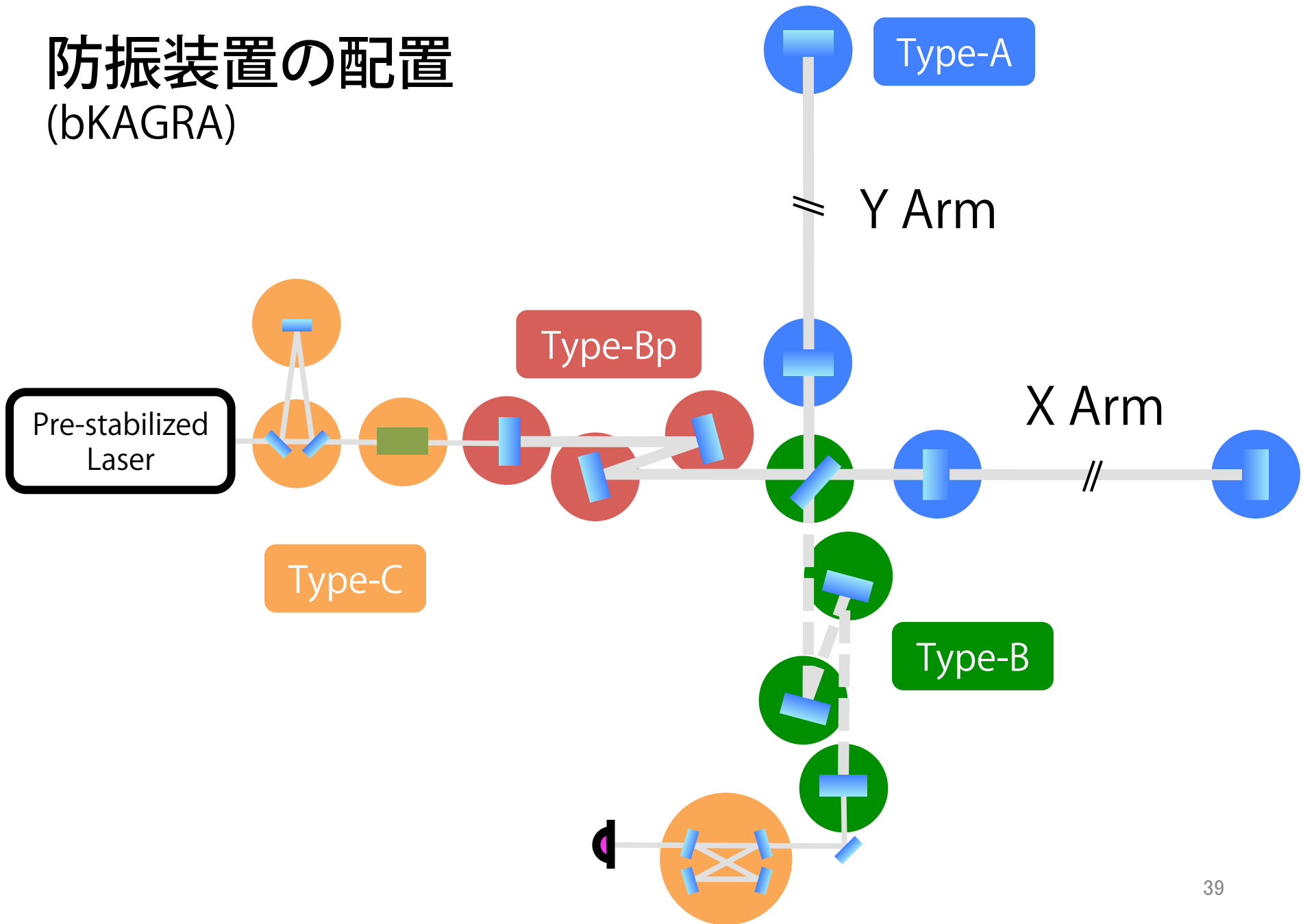
重力波による鏡の揺れ



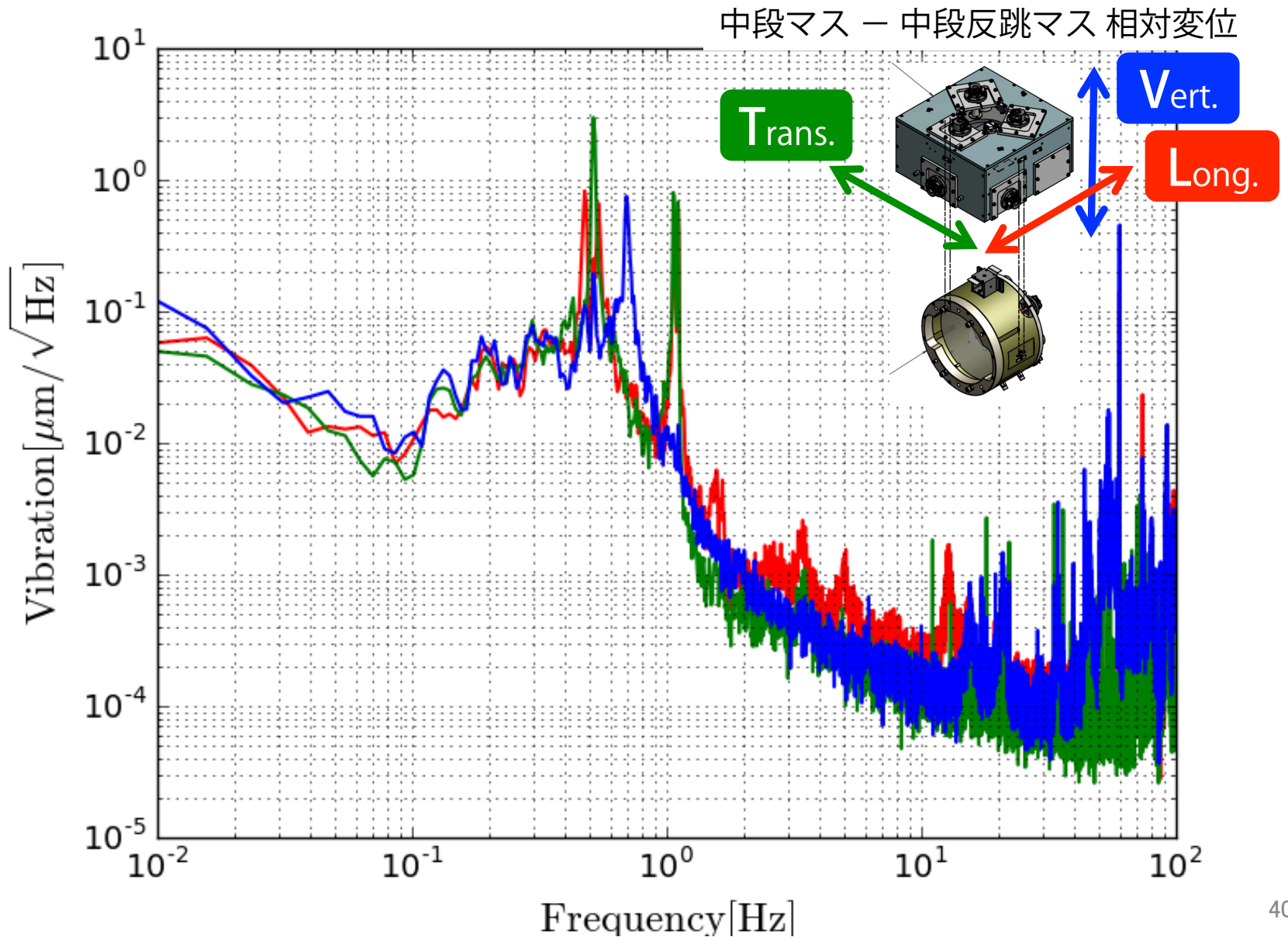
地面振動による鏡の揺れ

区別できない → 雑音となる

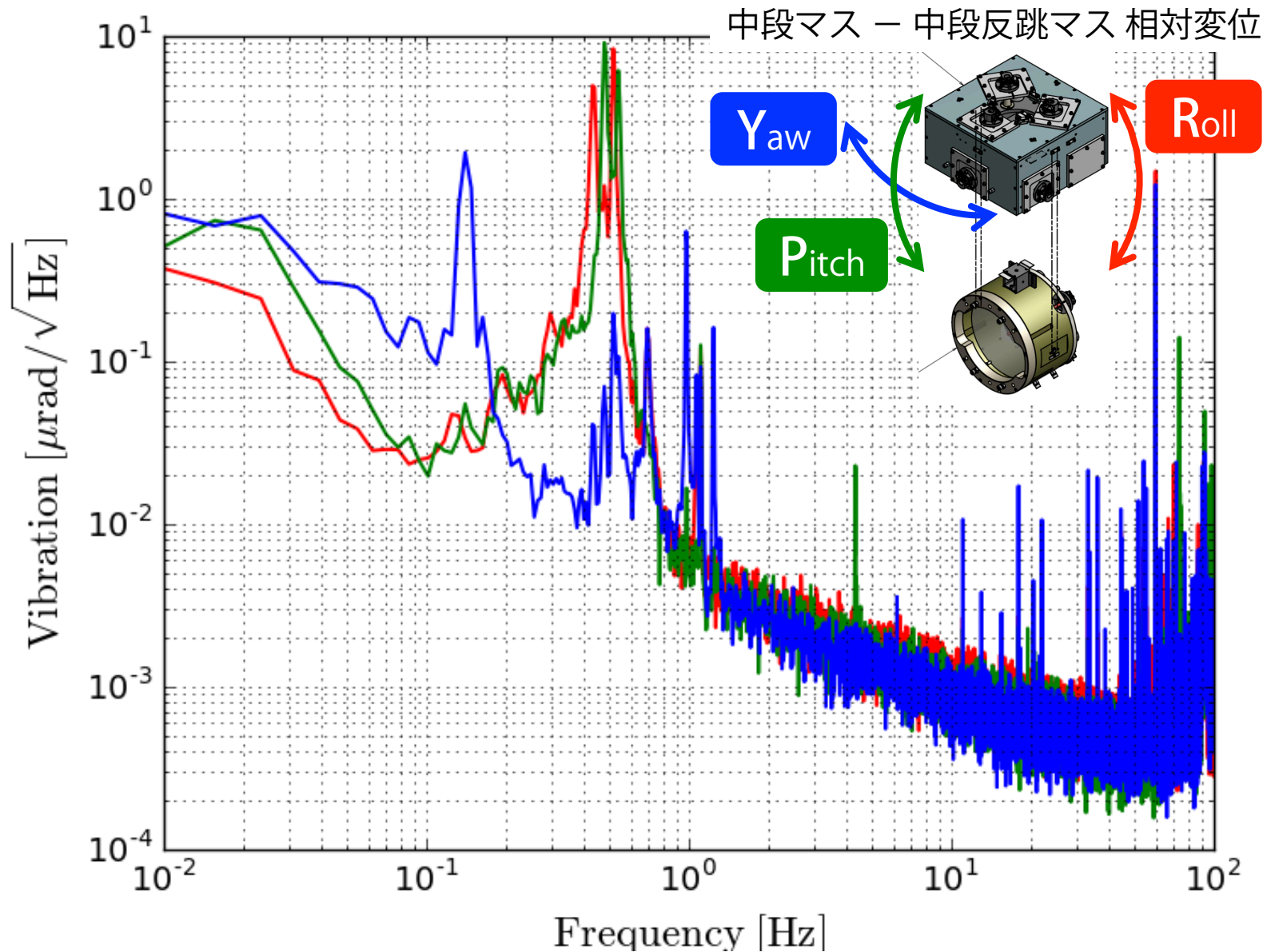
防振装置の配置 (bKAGRA)



振動スペクトル (並進)

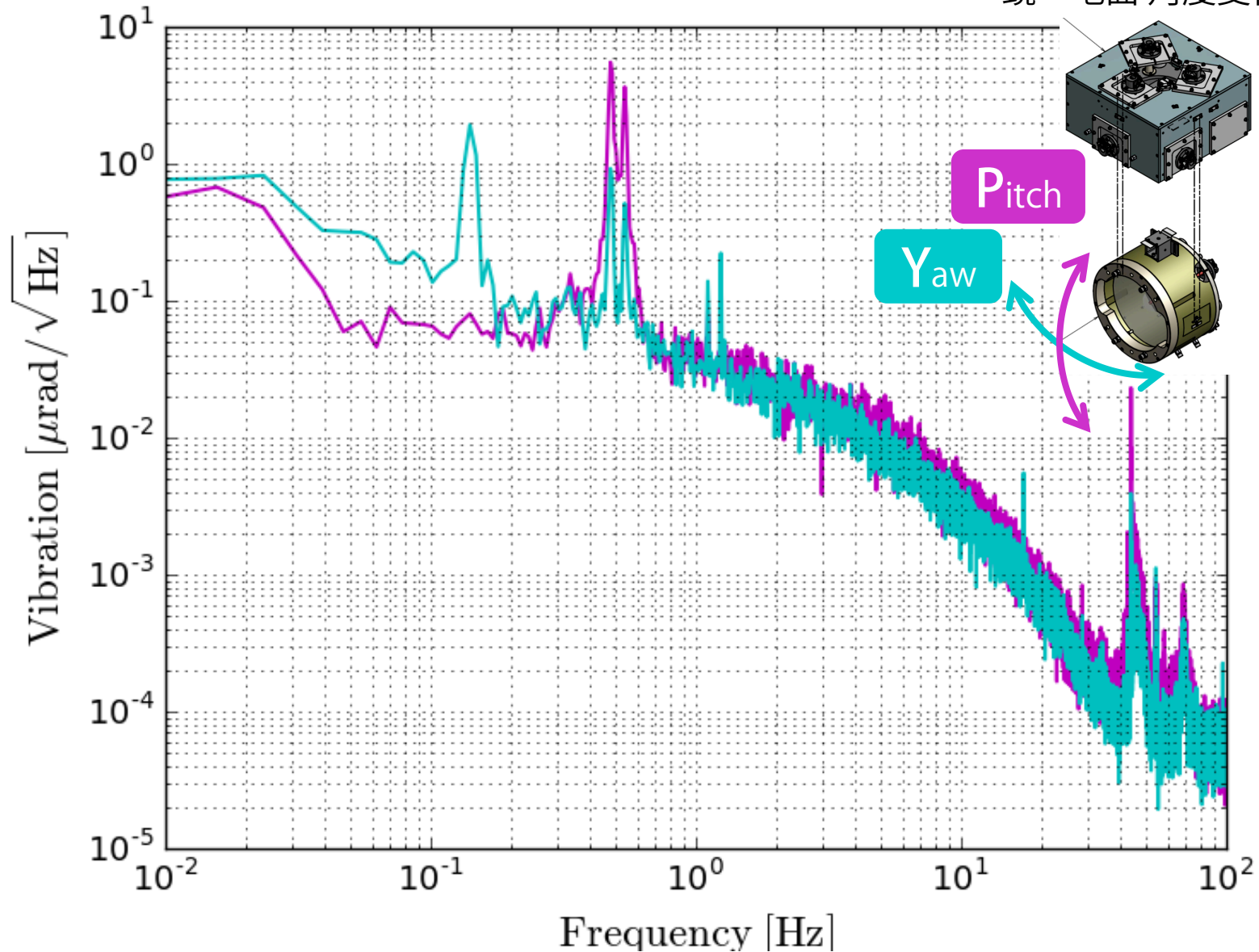


振動スペクトル (回転)

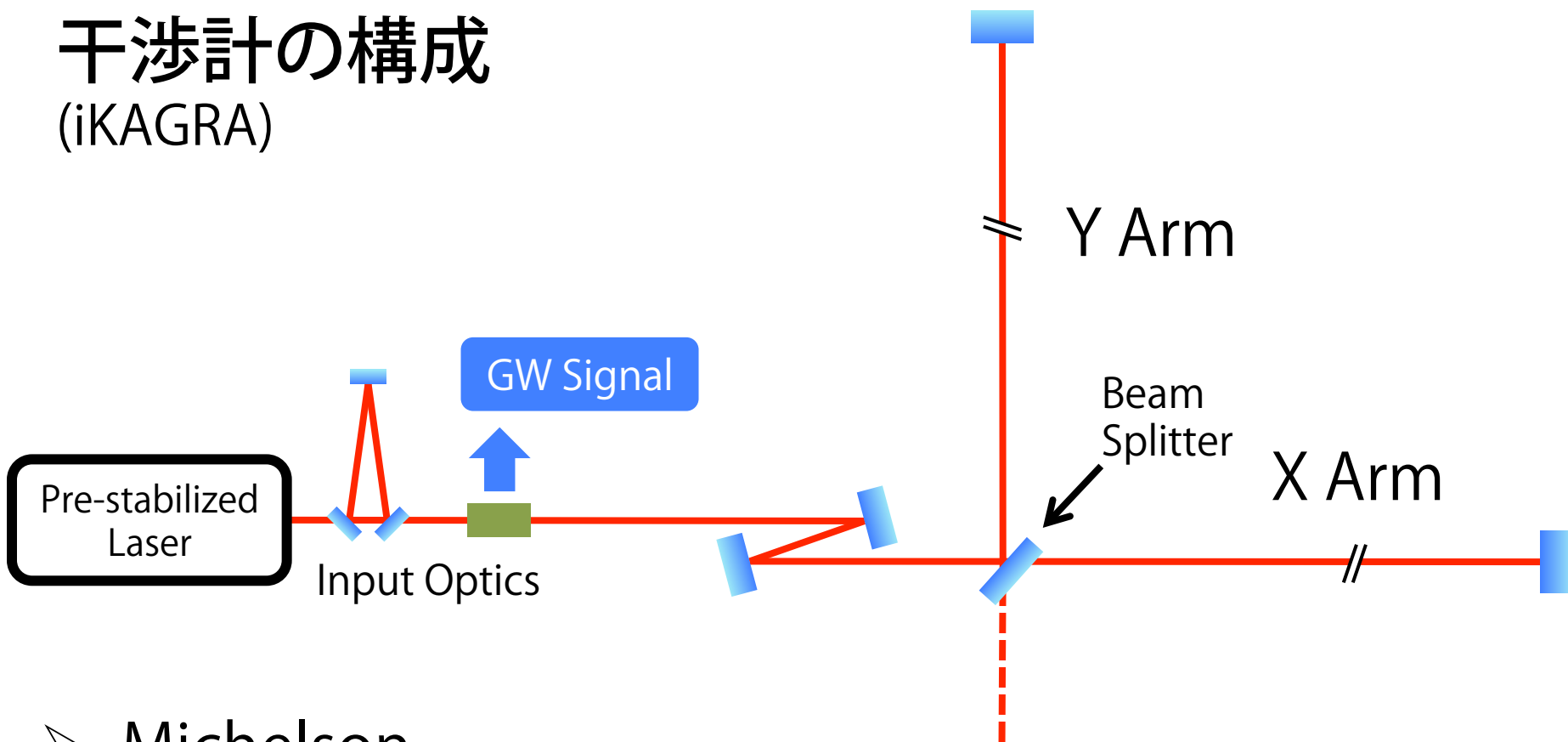


振動スペクトル (光てこ)

鏡-地面 角度変位

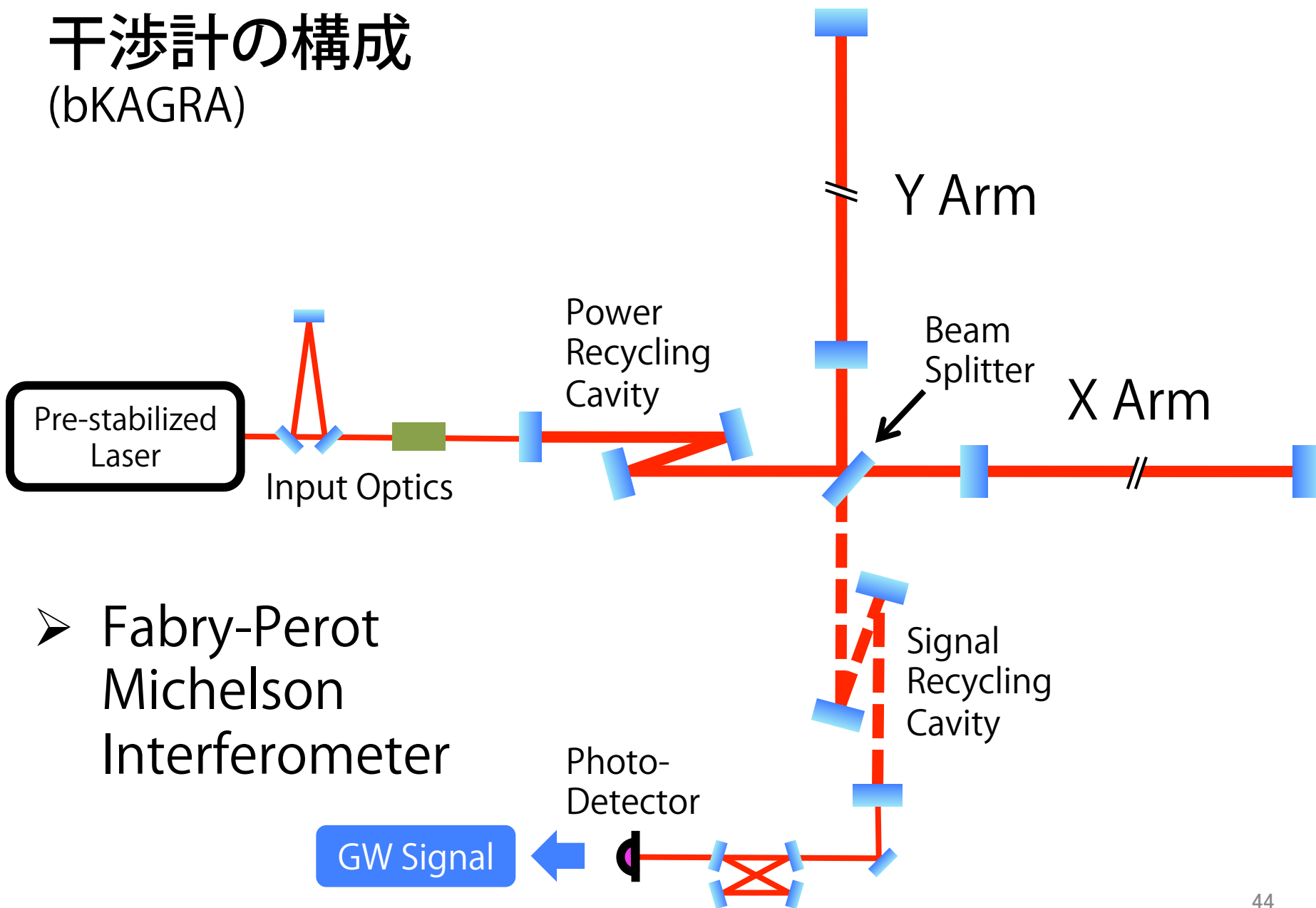


干渉計の構成 (iKAGRA)



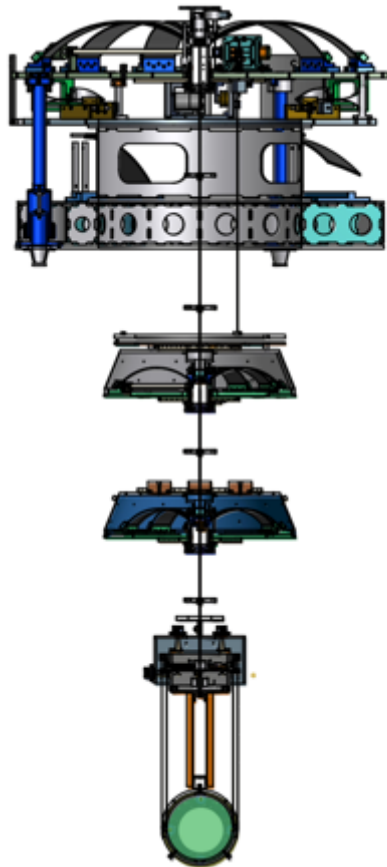
- Michelson Interferometer

干渉計の構成 (bKAGRA)

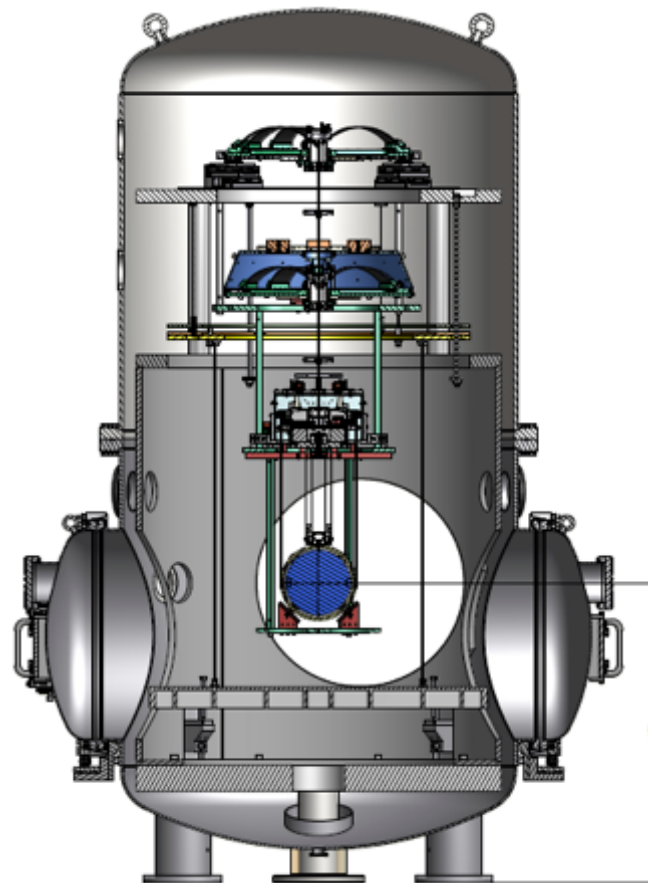


➤ Fabry-Perot
Michelson
Interferometer

Type-B



Type-Bp



3D CAD of KAGRA SAS

Lowering Resonant Frequency

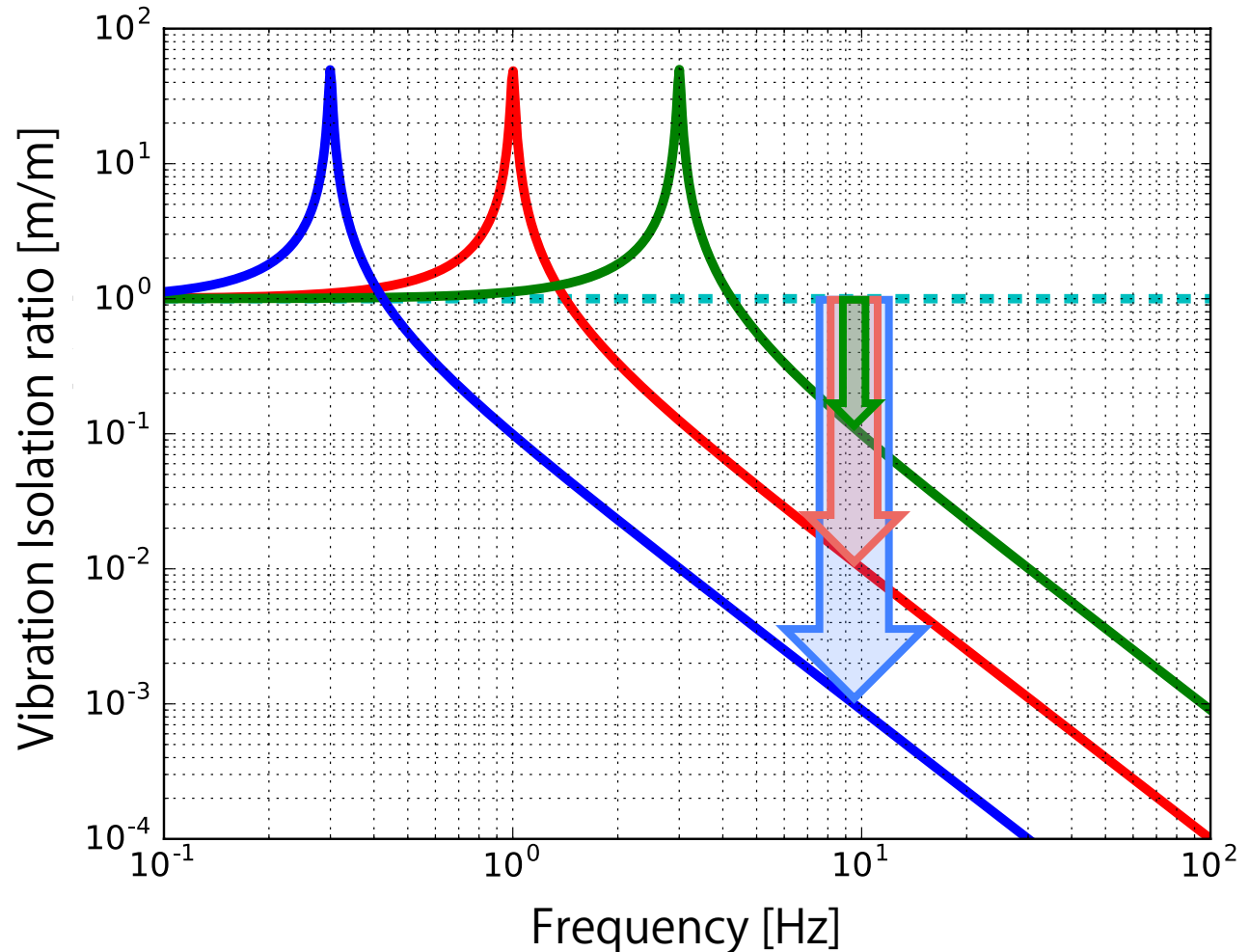
Vibration
isolation ratio:

$$\frac{X}{X_0} \propto \left(\frac{f}{f_0} \right)^2$$

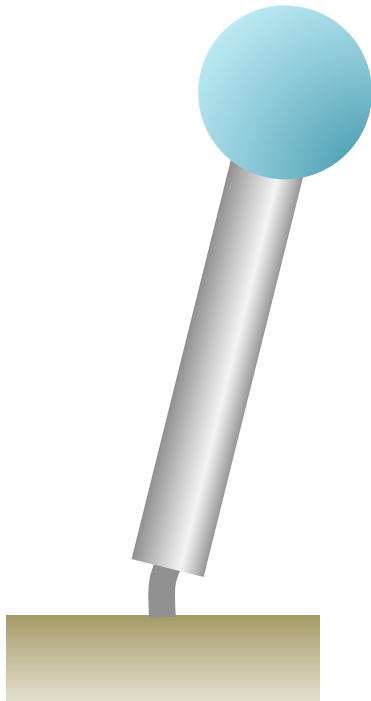
Resonant freq:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

We want smaller
spring constant k



Techniques for smaller k



Inverted **P**endulum

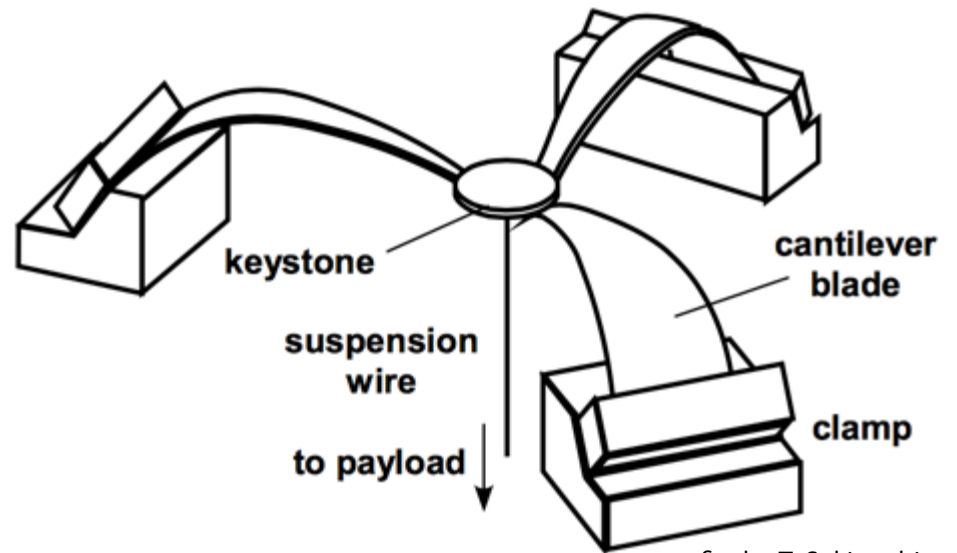
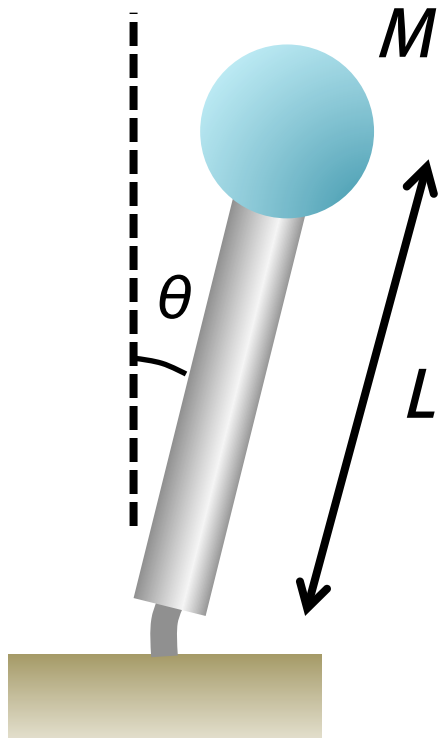


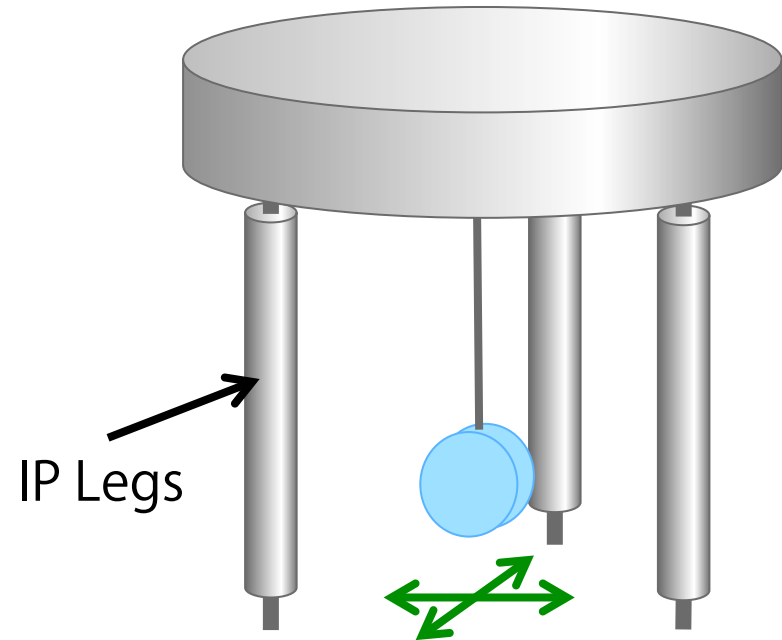
fig. by T. Sekiguchi

Geometric
Anti-**S**pring filter

Inverted Pendulum

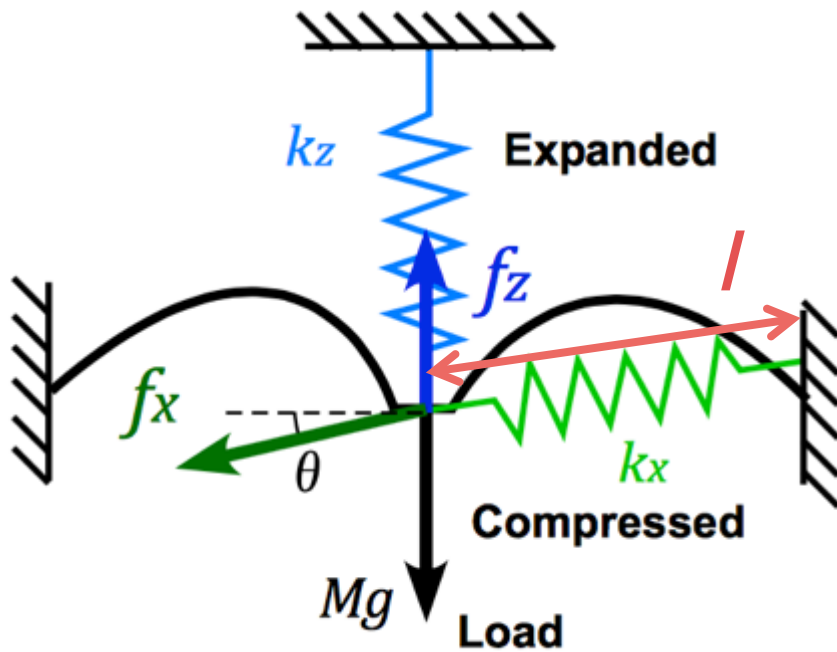


$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\theta}}{L^2} - \frac{Mg}{L}$$

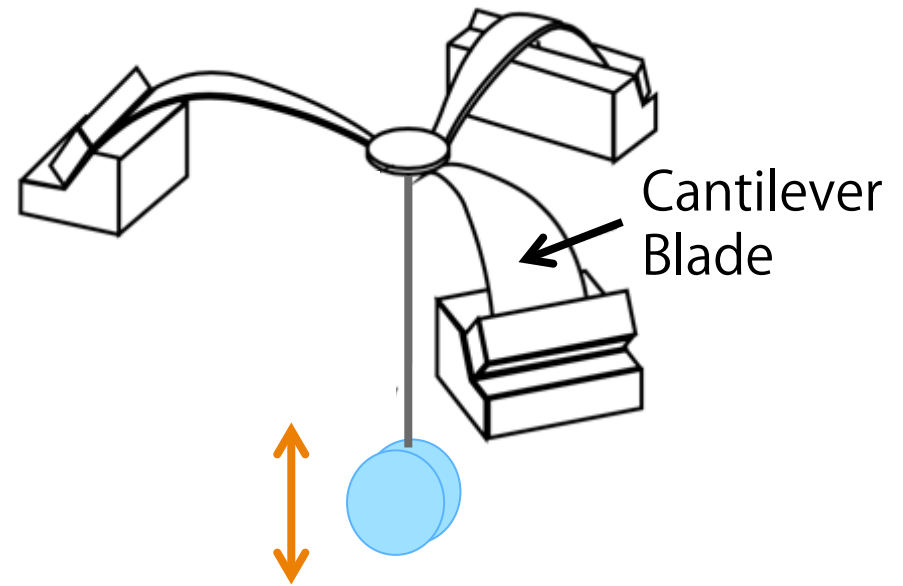


Low-freq. resonance in
horizontal motion

Geometric Anti-Spring Filter



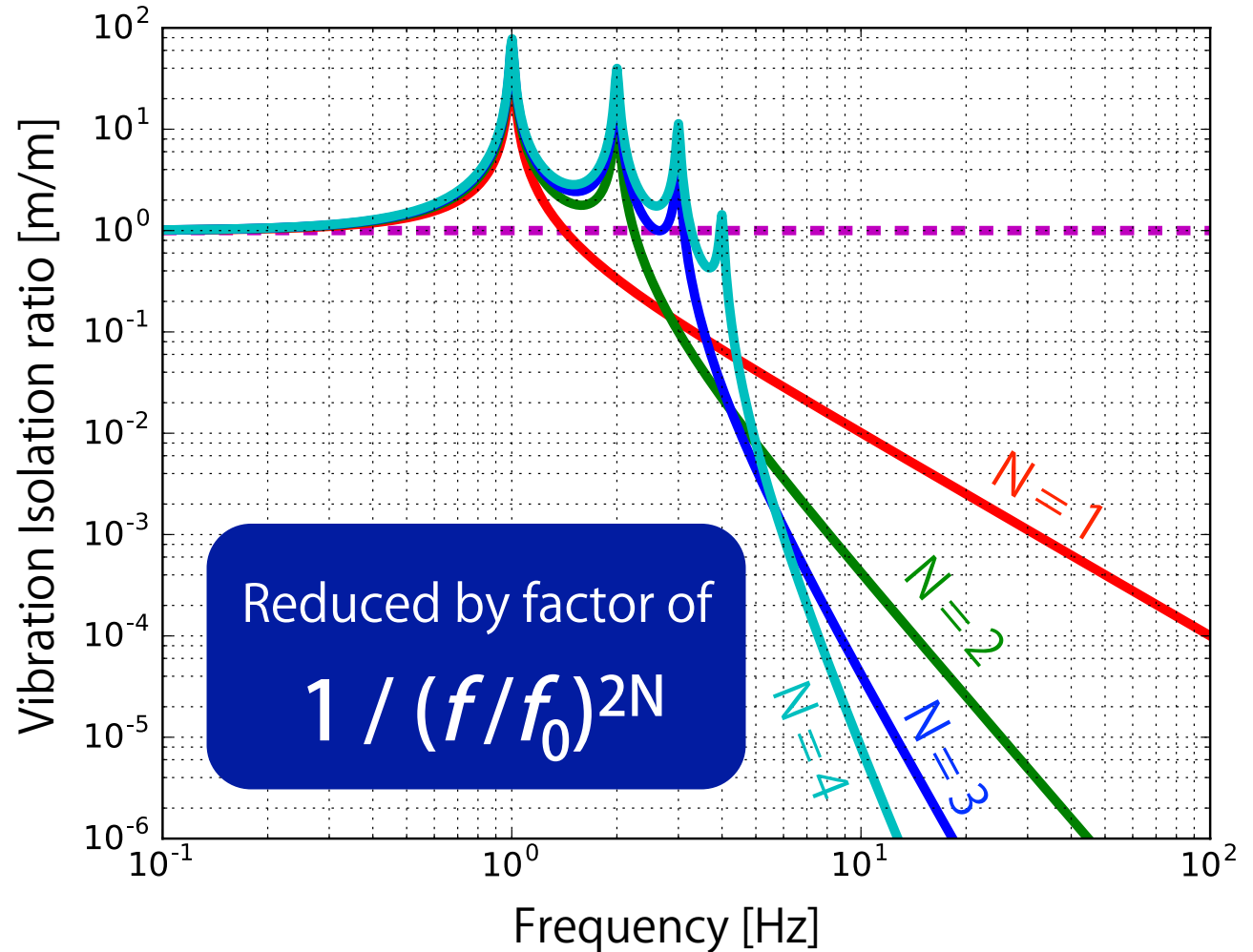
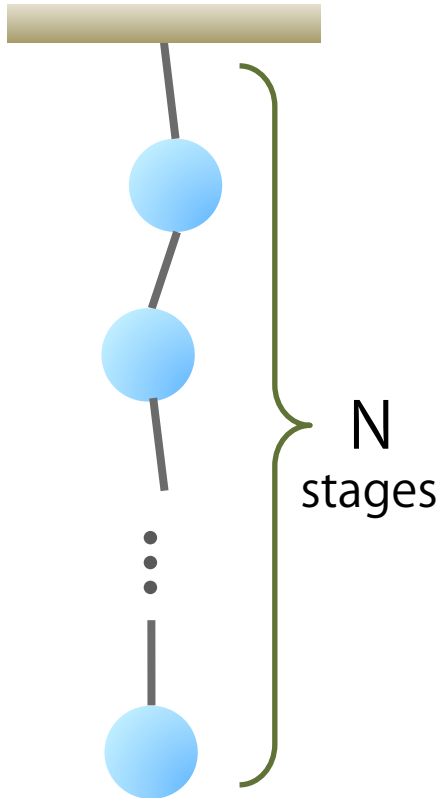
figs. by T. Sekiguchi



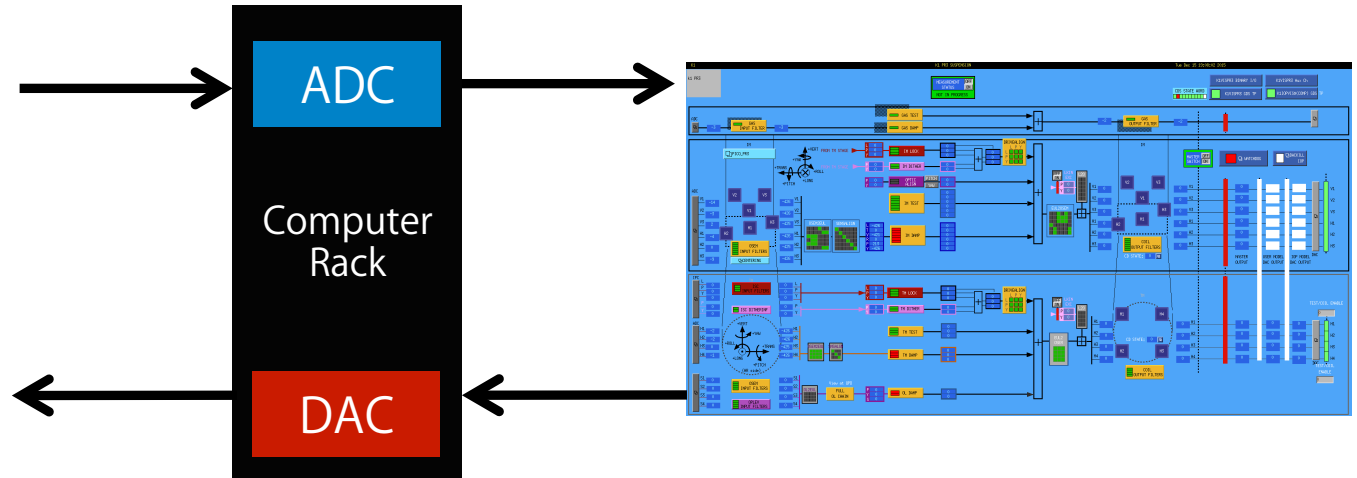
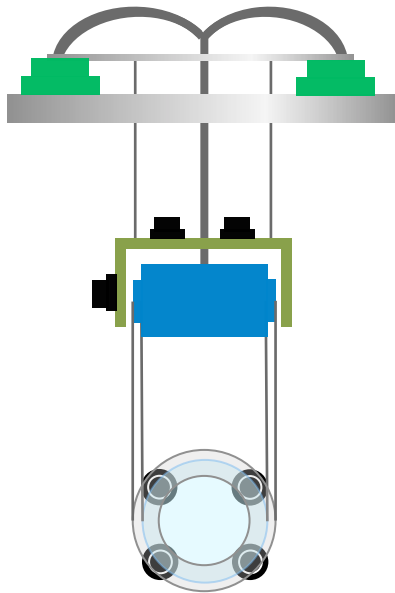
$$k_{\text{eff}} = k_z - a(l)k_x$$

Low-freq. resonance in
vertical motion

Multi-stage Suspension



制御系



- メカニカル系
- センサ
- アクチュエータ

- ADC, DAC
- Real time computer
- ドライバ回路類

- 自由度変換
- フィルタの実装
- 出力監視システム
- 懸架系の状態の操作