

KAGRA 用防振装置の開発 XVII (インストール)

藤井善範

東京大学 理学系研究科 天文学専攻

国立天文台 重力波プロジェクト推進室

高橋竜太郎, 正田亜八香, Fabian Pena Arellano, Mark Barton, 阿久津智忠, 平田直篤,
石崎秀晴, 大淵喜之, 浦口史寛, 池之上文吾, 斎藤栄, 大石奈緒子,
麻生洋一(国立天文台), 奥富弘基 (総研大), Ettore Majorana(INFN Rome),
Joris van Heijningen, 我妻一博(NIKHEF), Riccardo DeSalvo(Univ. Sannio),
宮川治, 上泉真裕, 内山隆, 山元一広 (東大宇宙線研), Raffaele Flaminio(国 立天文台)

Contents

◆ はじめに / iKAGRA

□ PR3 防振装置

□ Installation @ 神岡KAGRAサイト

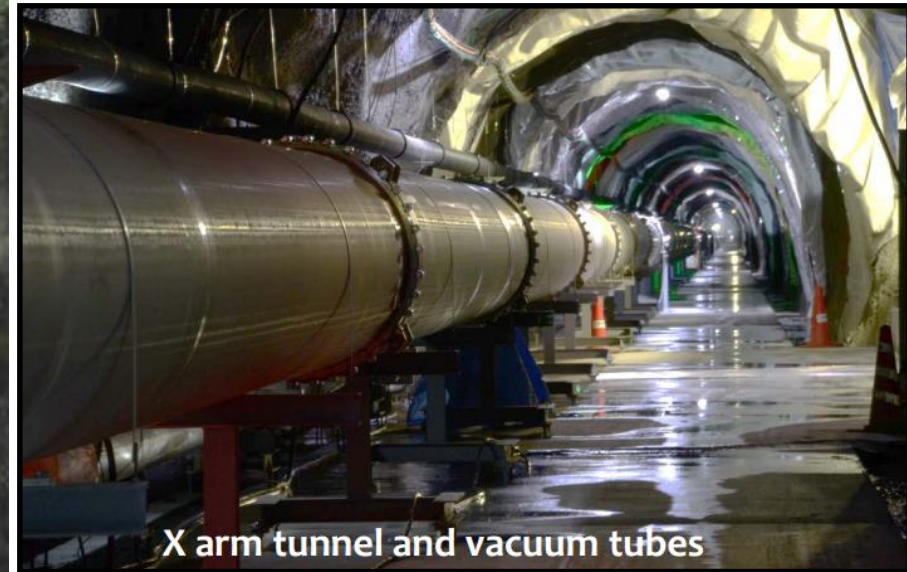
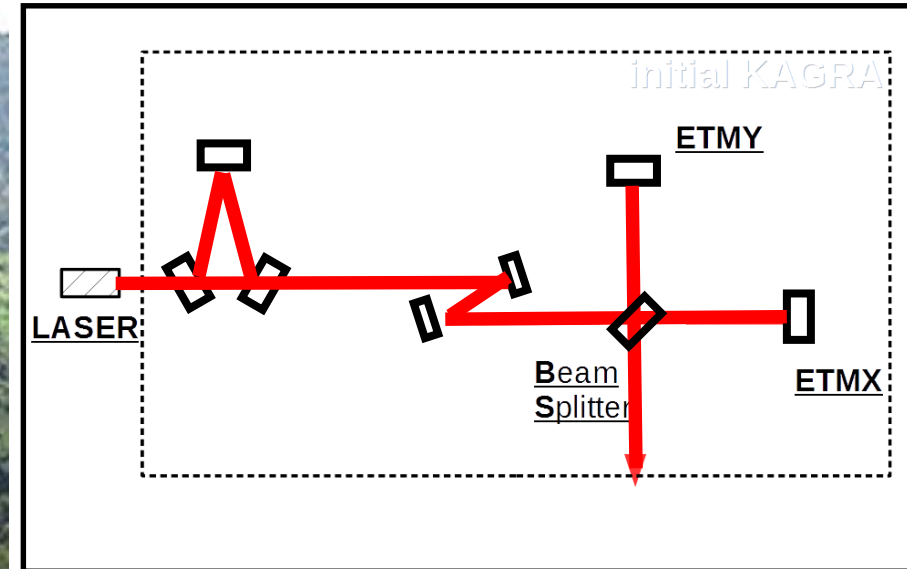
□ 組み立て

□ 干渉計での役割

❖はじめに : iKAGRA

大型低温重力波検出器 KAGRA

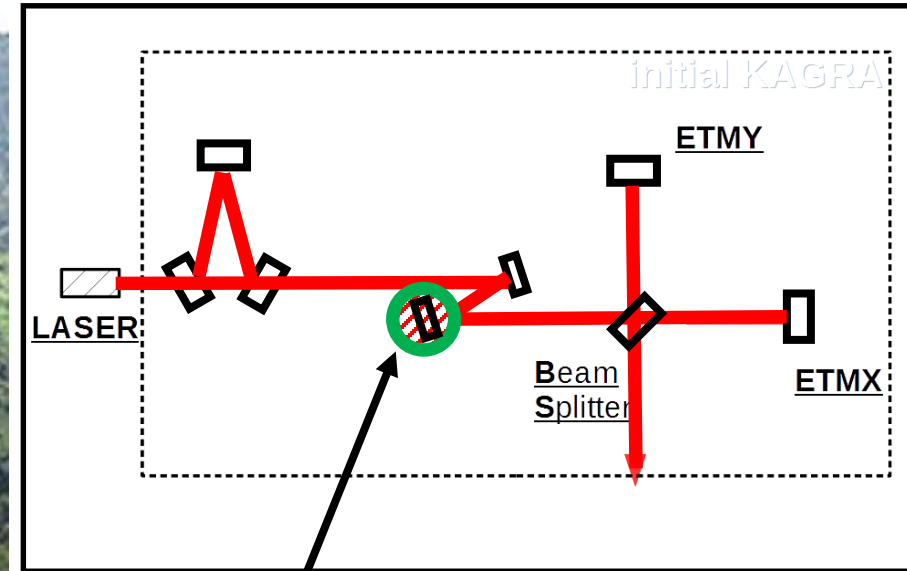
→ 試運転のための各種装置を
神岡鉱山地下にインストール。



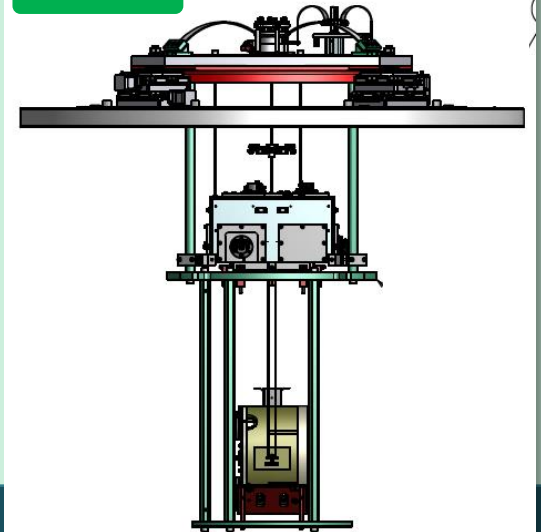
❖はじめに : iKAGRA

大型低温重力波検出器 KAGRA

→ 試運転のための各種装置を
神岡鉱山地下にインストール。



PR3



Contents

□ はじめに / iKAGRA

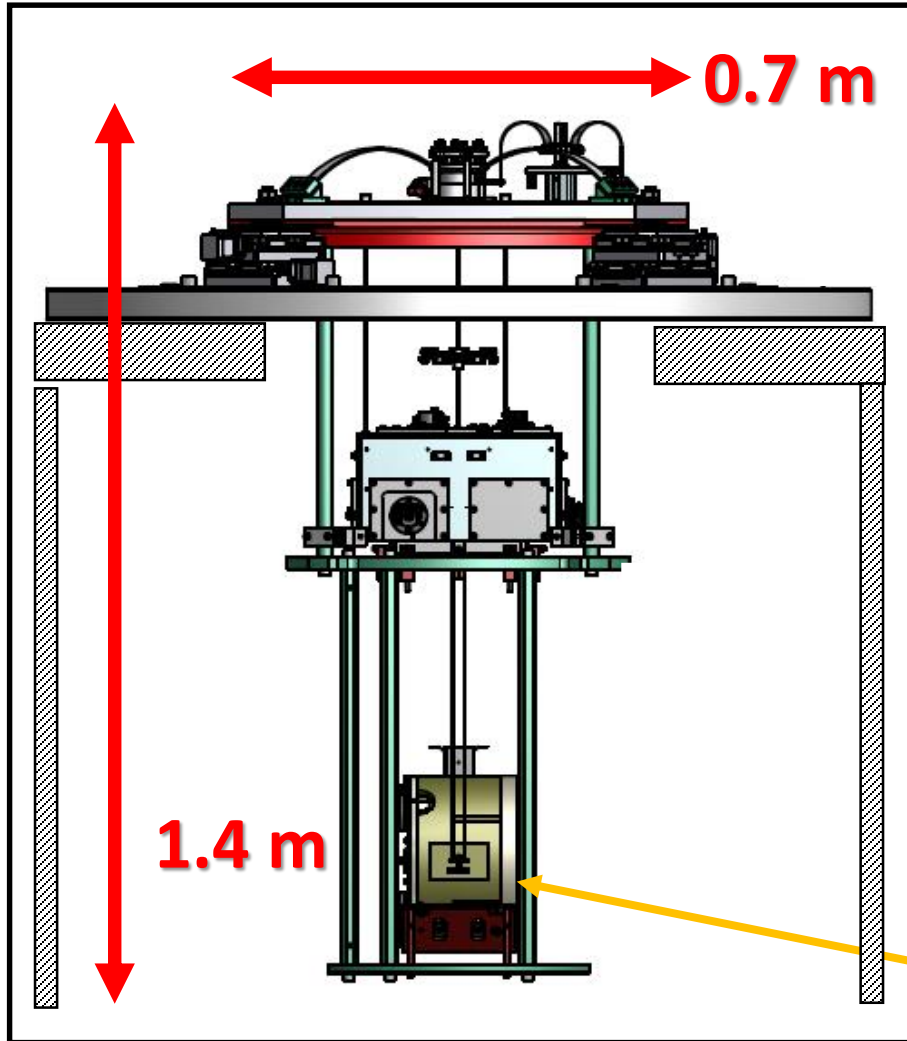
◆ PR3 防振装置

□ Installation @ 神岡KAGRAサイト

□ 準備 / 組み立て

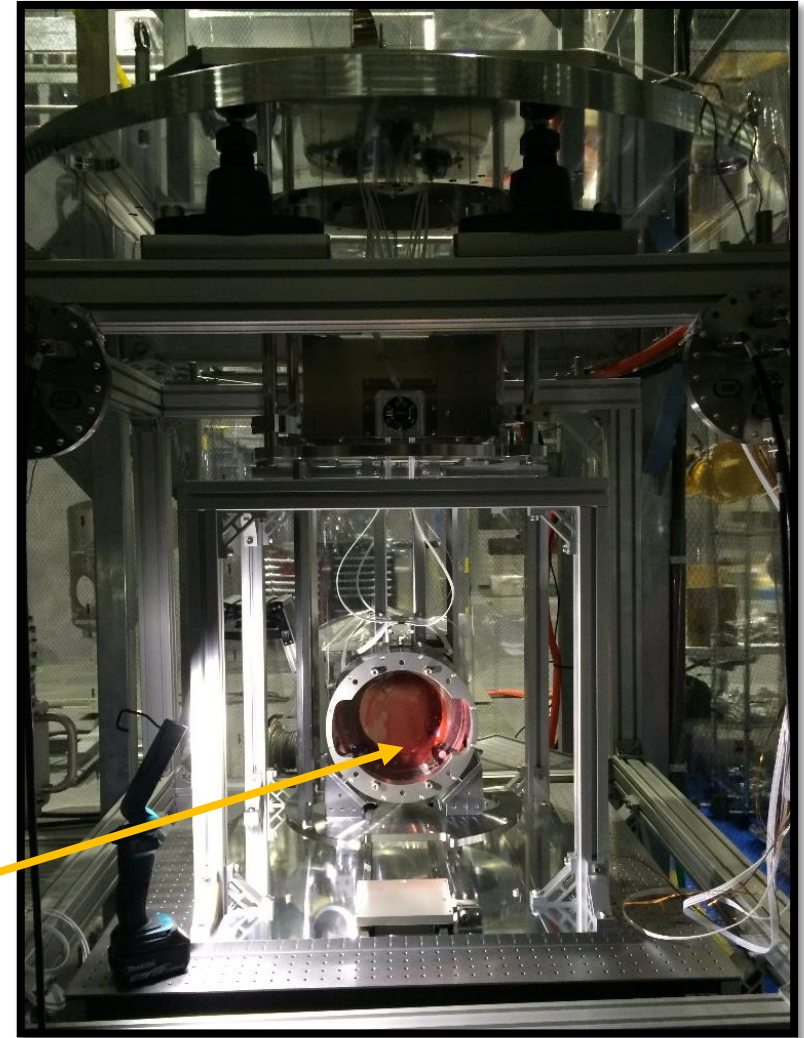
□ 干渉計での役割

◆ PR3 防振装置

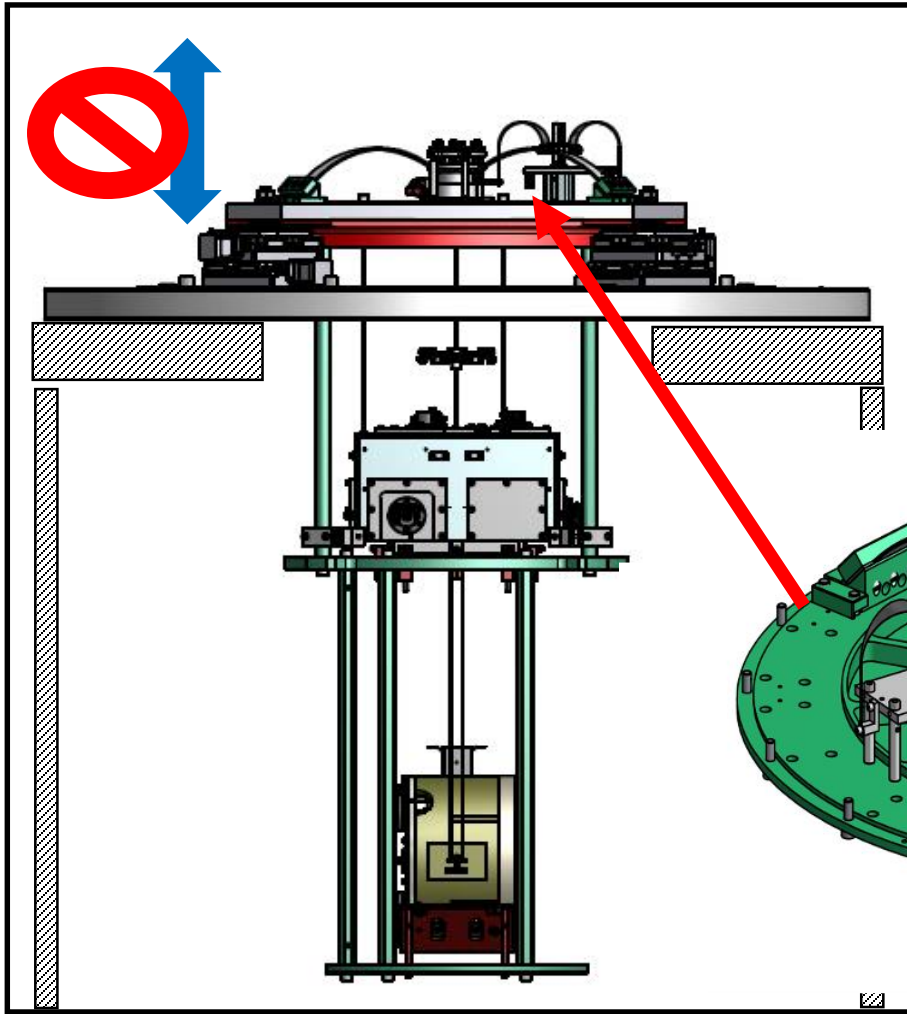


PR用 防振装置
in iKAGRA

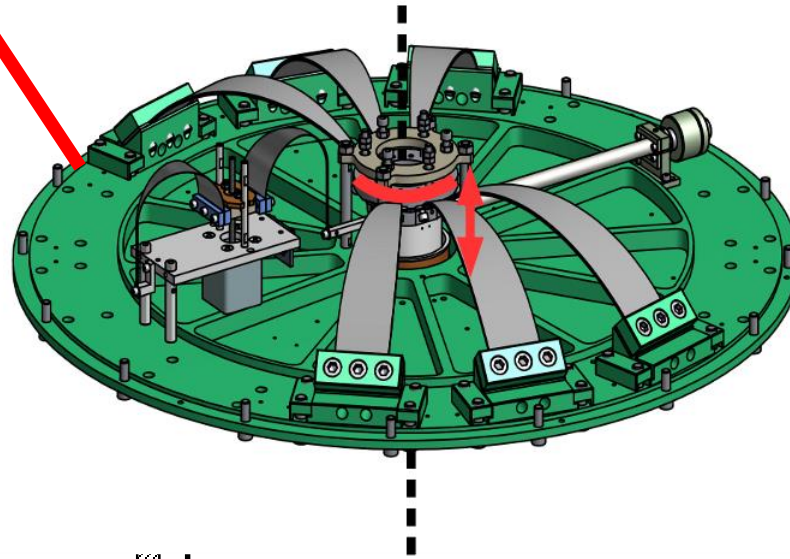
Mirror



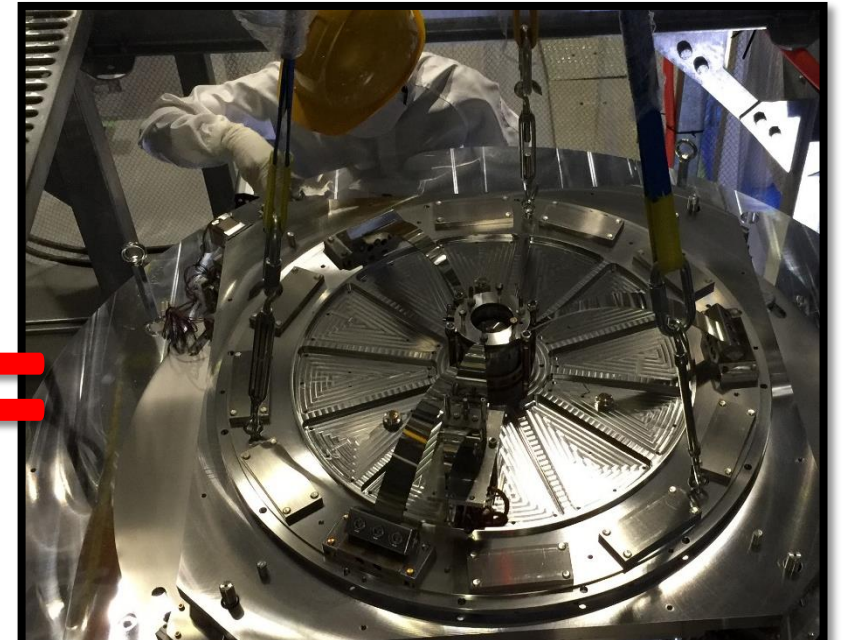
❖ PR3 防振装置



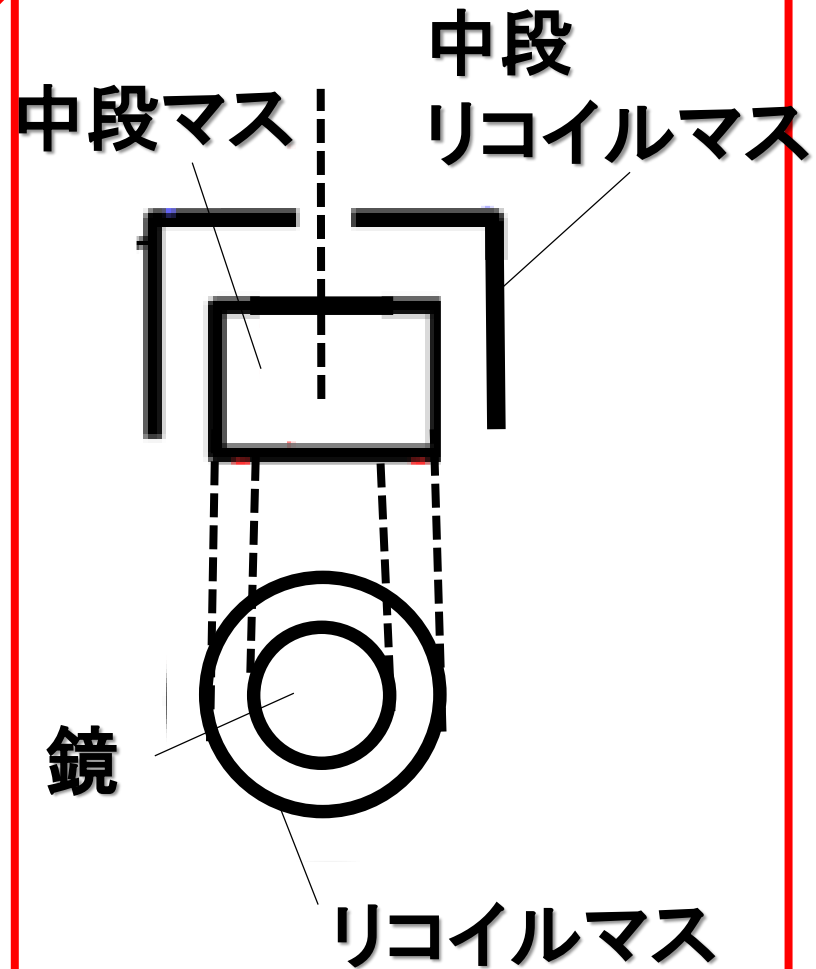
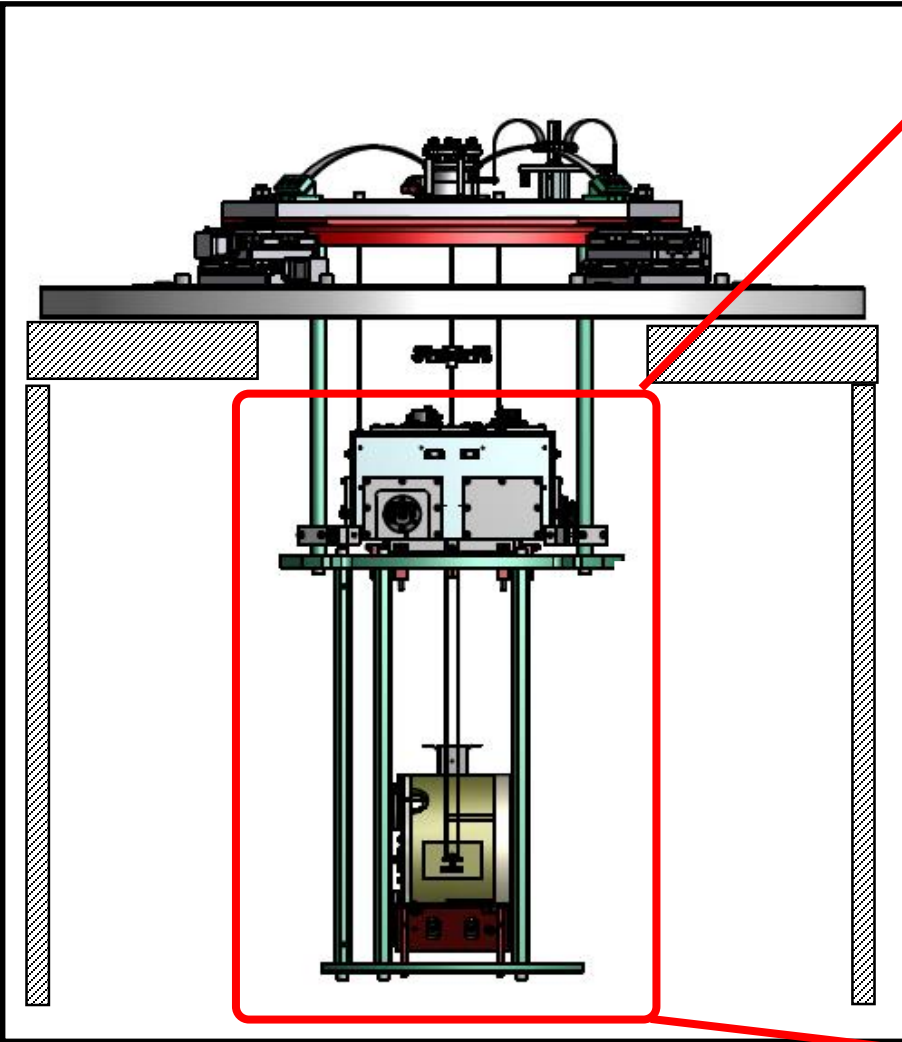
Geometric Anti-Spring(GAS) Filter ;
垂直方向の防振に必要。1 段使用



=



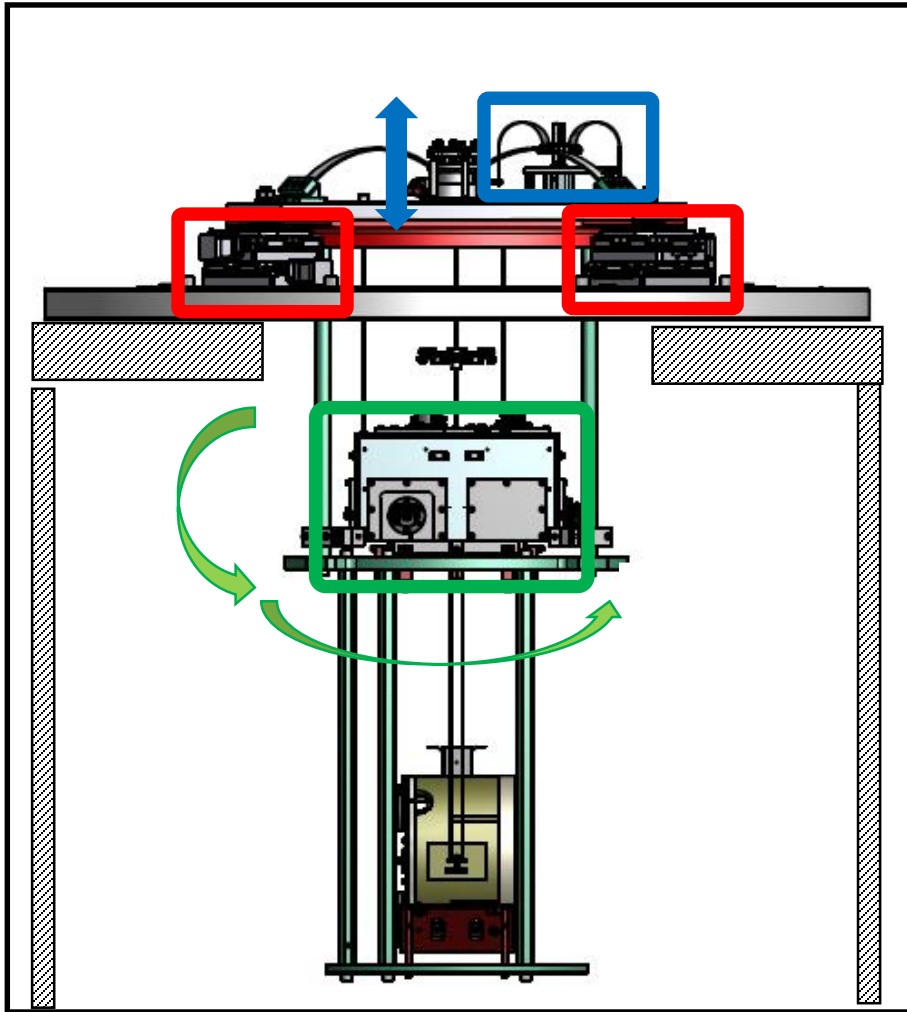
◆ PR3 防振装置



鏡とその覆いとの、
相対的な傾きの
微調整を行う。

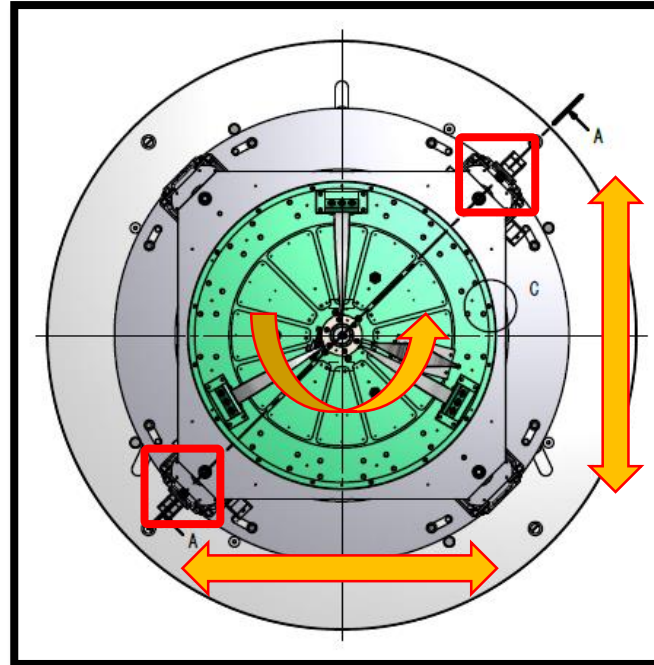
現在鏡は
リコイルマスに
固定。

◆ PR3 防振装置 / 初期アライメント機構



“Traverser”

防振装置全体の
並進2軸方向と
垂直軸周りの回転方向



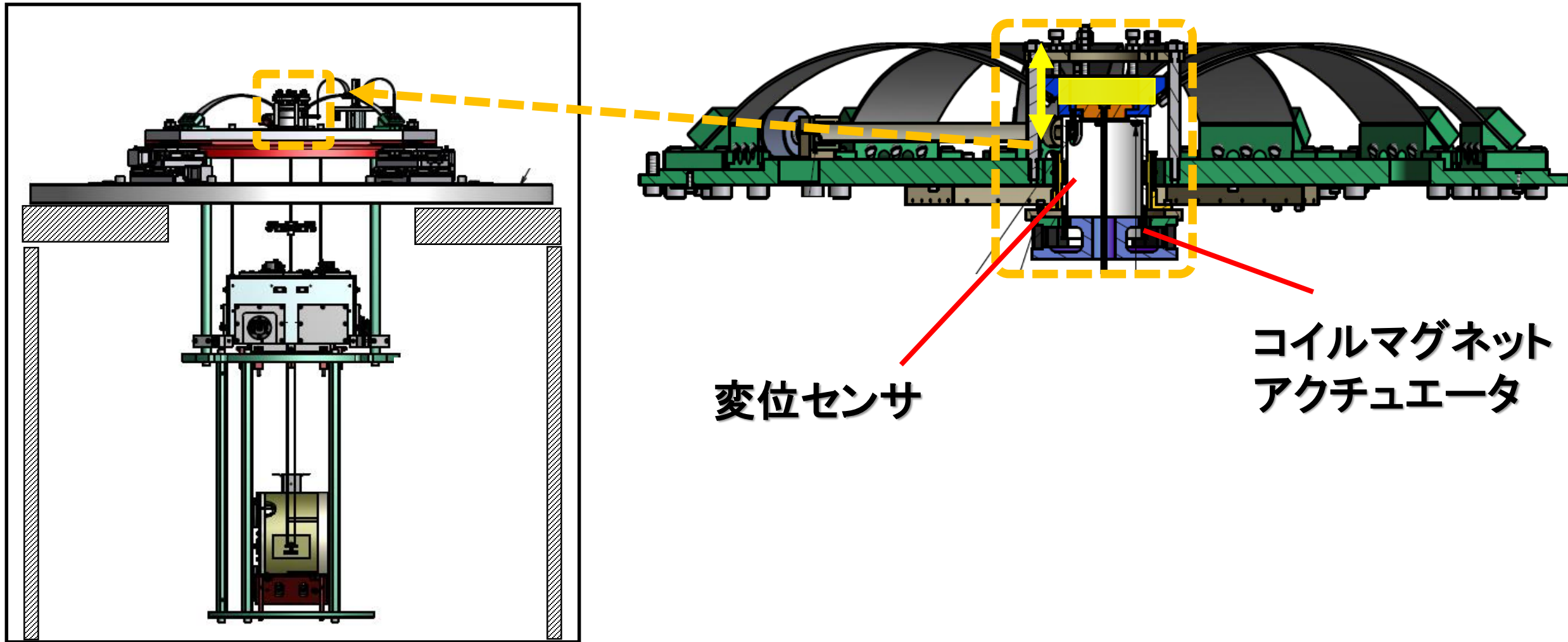
“Fishing rod”

鏡の垂直軸方向

DC tilt adjustment

中段マスの回転
2方向

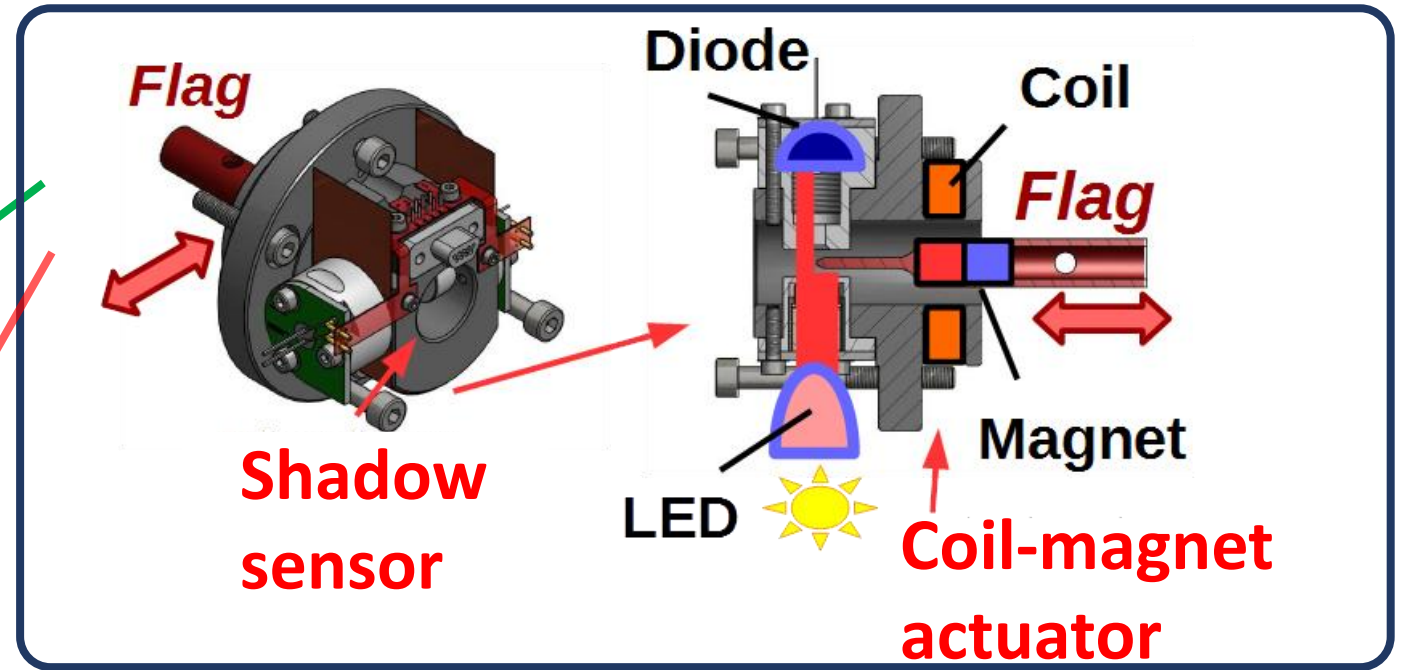
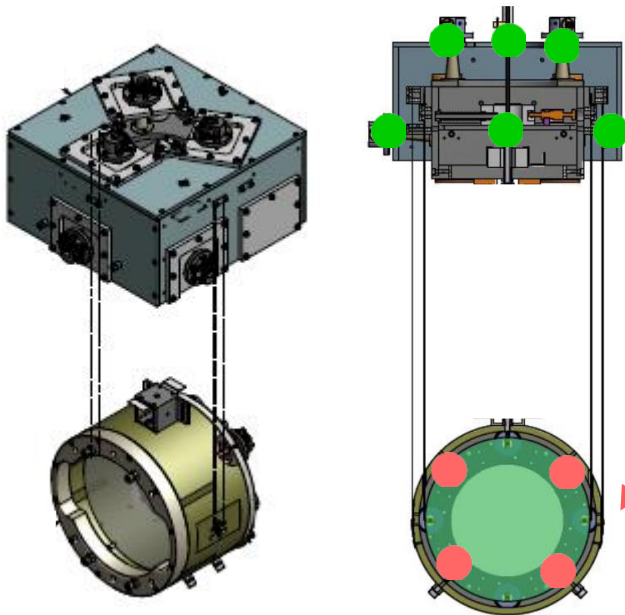
◆ PR3 防振装置 / センサ, アクチュエータ



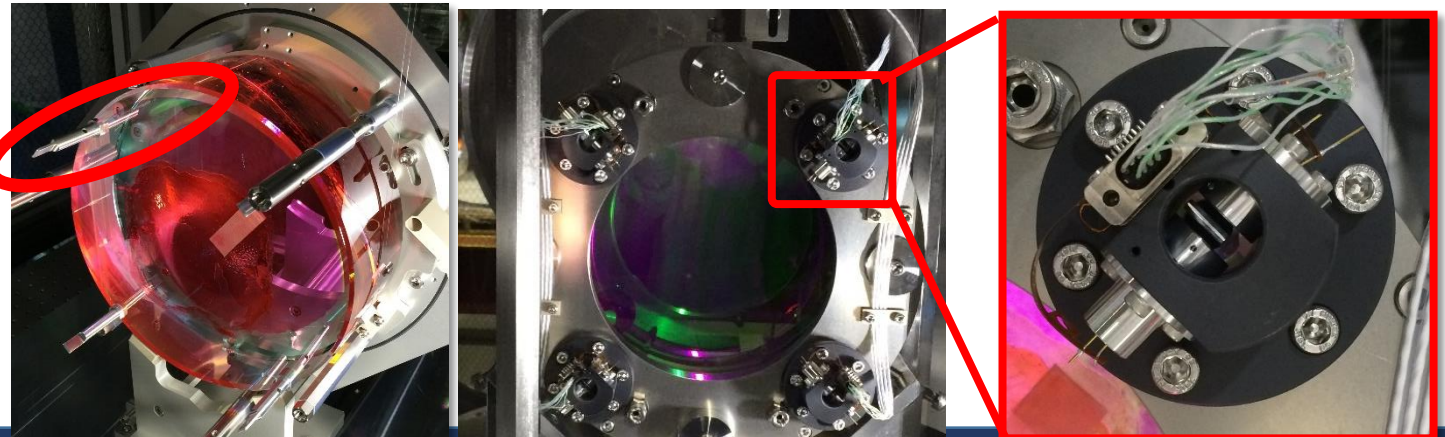
❖ PR3 防振装置 / センサ, アクチュエータ

Optical Sensors and Electro-Magnetic Actuators

→ シャドウセンサ &
コイルマグネット
アクチュエータ



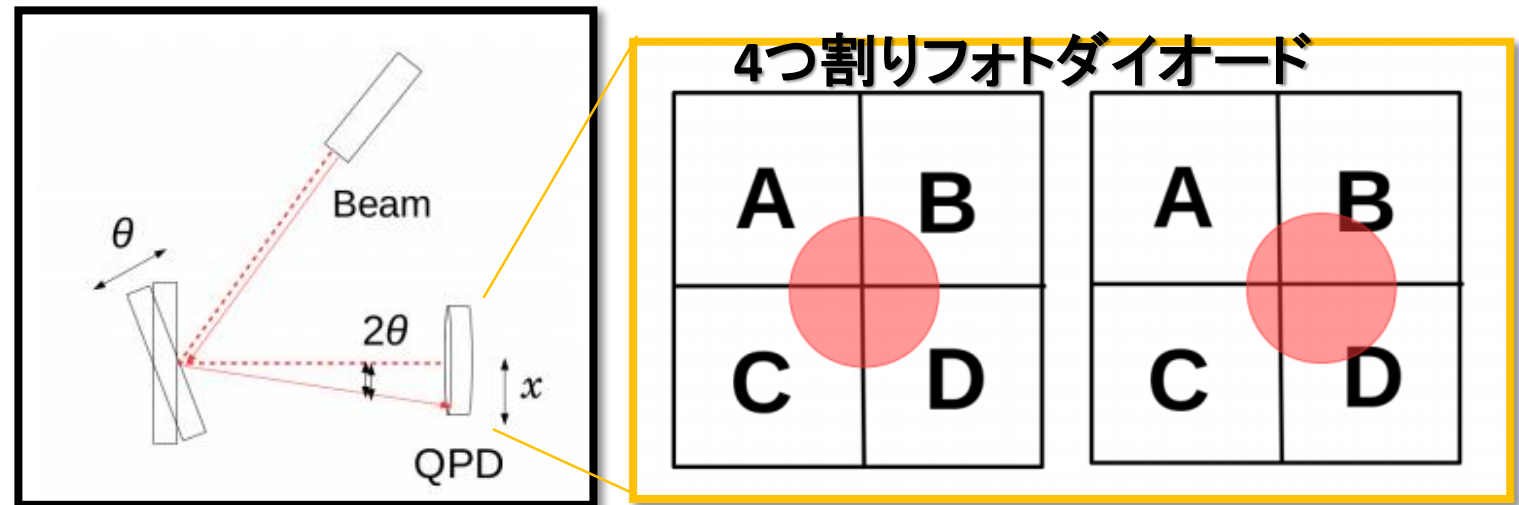
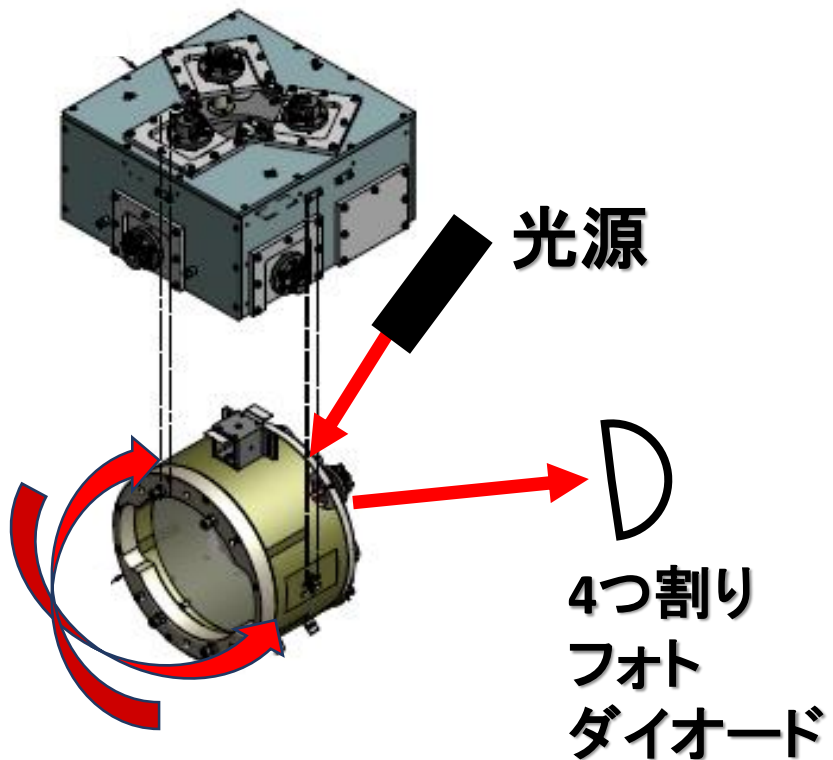
Flag



❖ PR3 防振装置 / センサ, アクチュエータ

光てこ (**Optical Lever**):

OSEM では見えない、
鏡全体の回転を測定するためのセンサ



ビームスポットの変位 → 角度変化

Contents

□ はじめに / iKAGRA

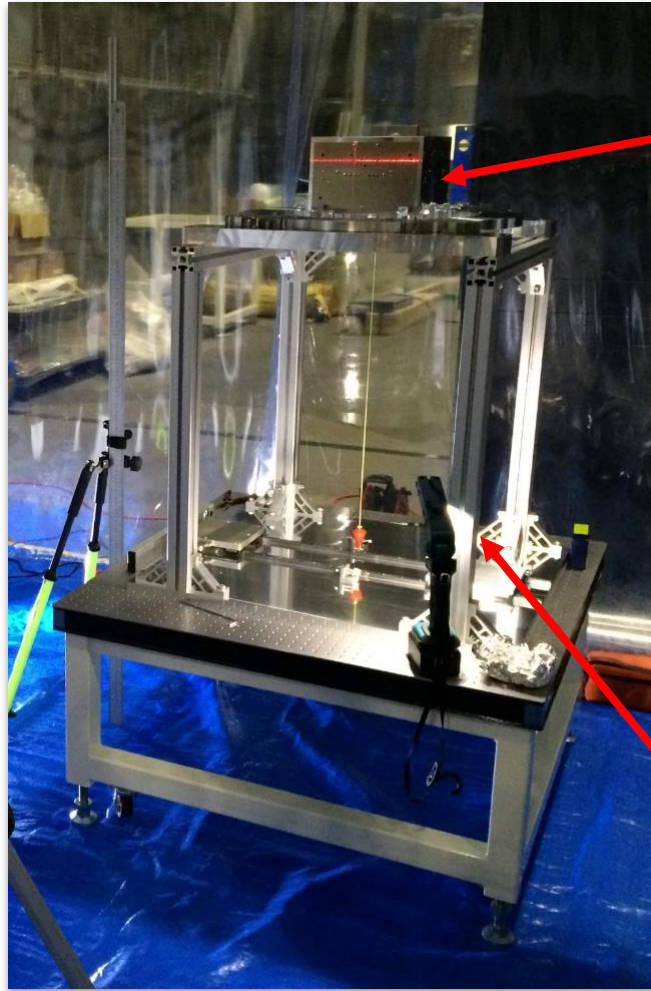
□ PR3 防振装置

❖ Installation (@ 神岡KAGRAサイト)

❖ 組み立て

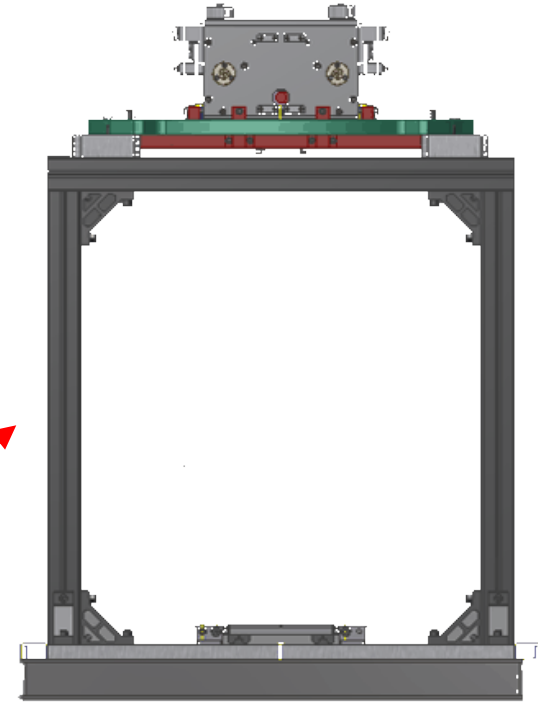
❖ 干渉計での役割

❖ Installation / 組み立て

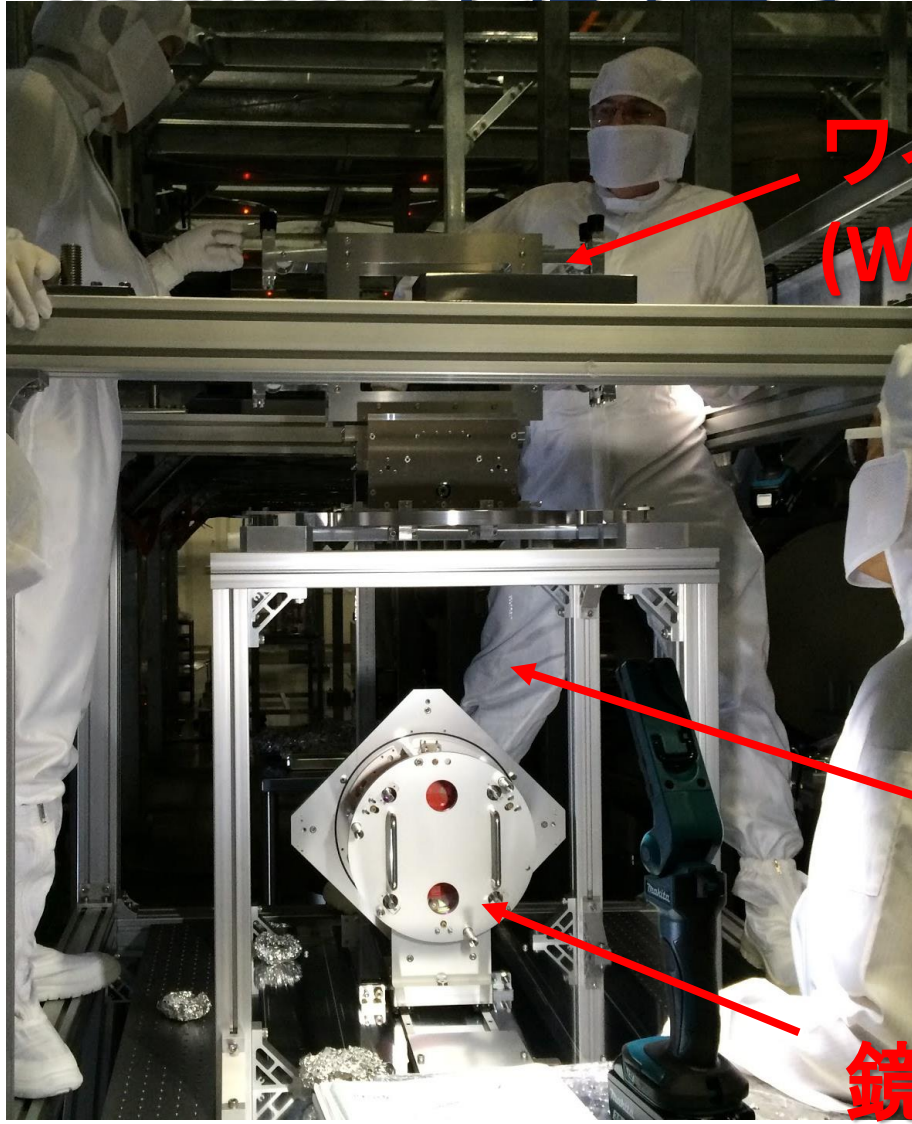


中段マス

鏡懸架用ジグ



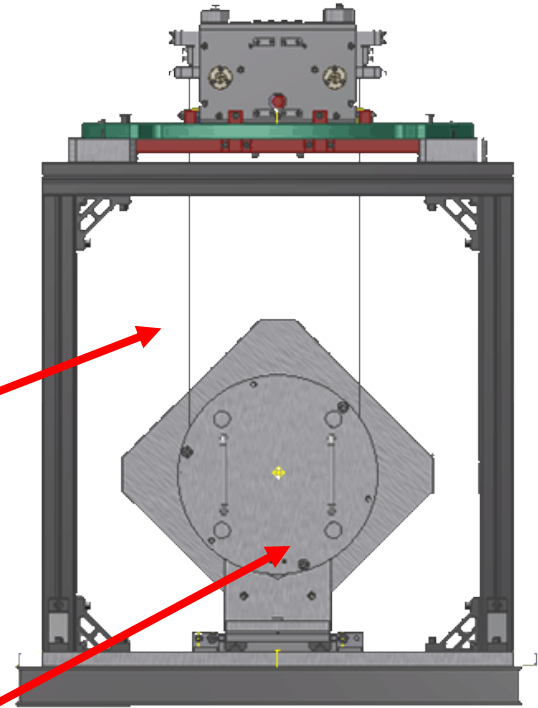
❖ Installation / 組み立て



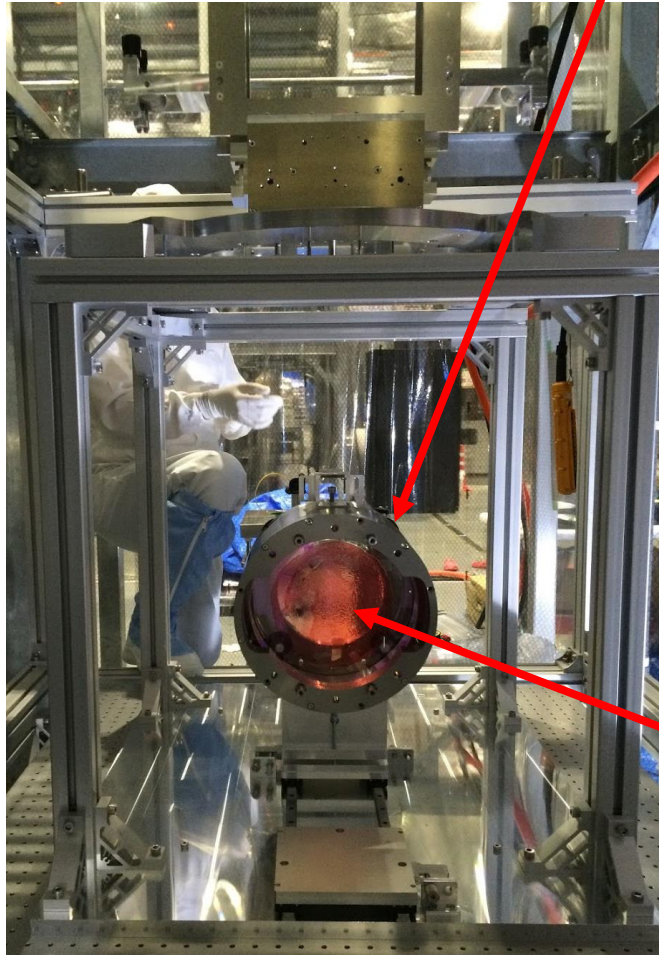
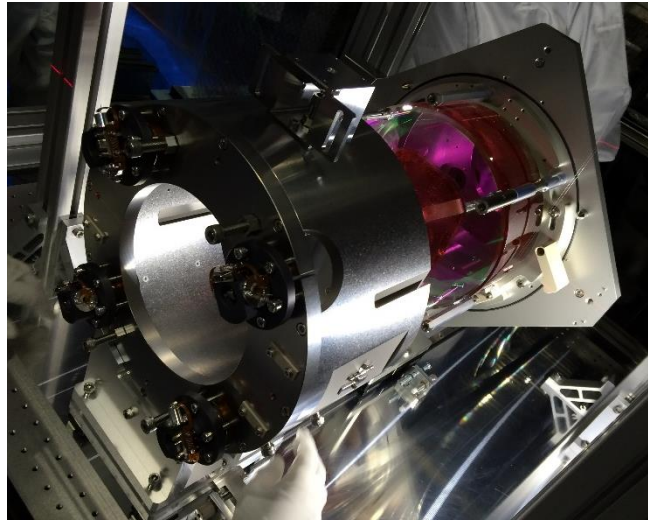
ワイヤ巻き付け用ジグ
(Winch)

ワイヤ

鏡保護・梱包用ジグ

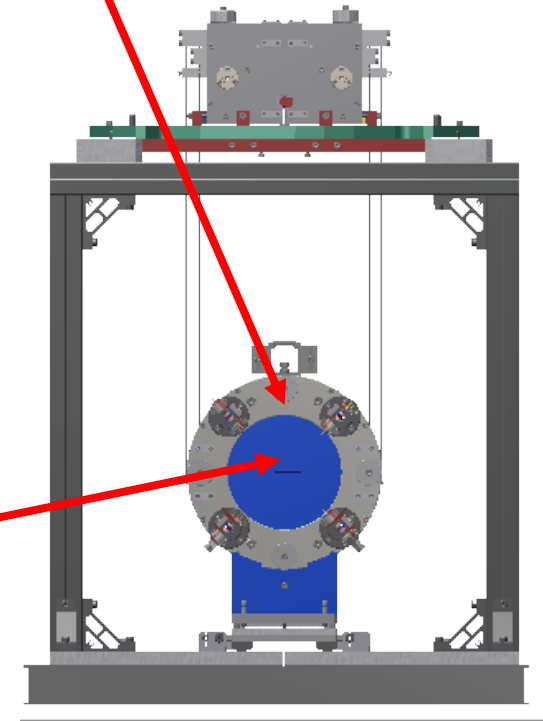


❖ Installation / 組み立て

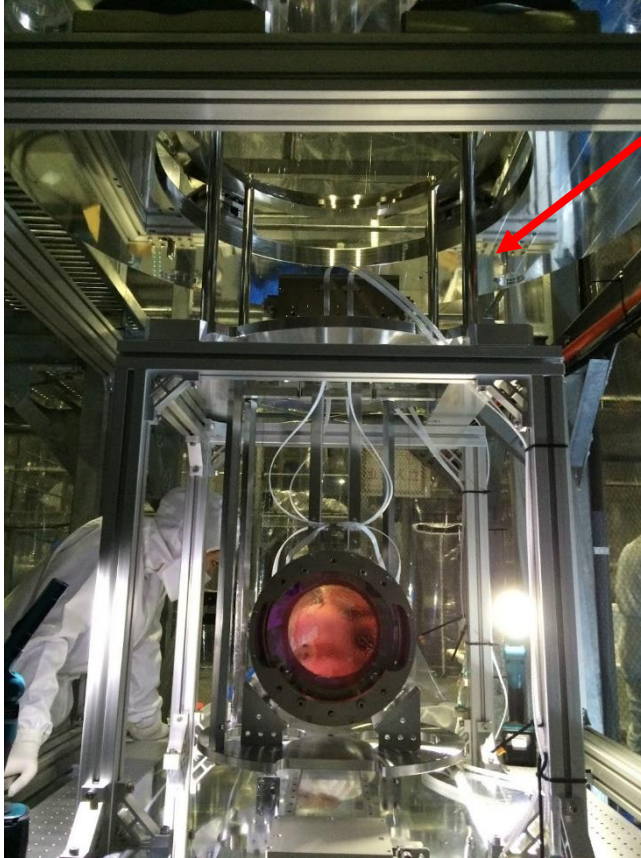


リコイルマス

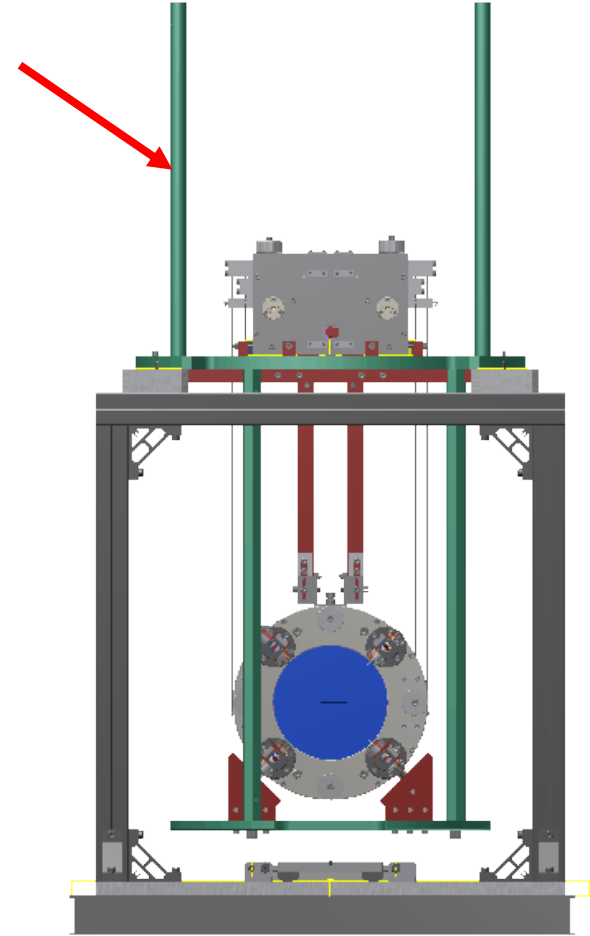
鏡



❖ Installation / 組み立て

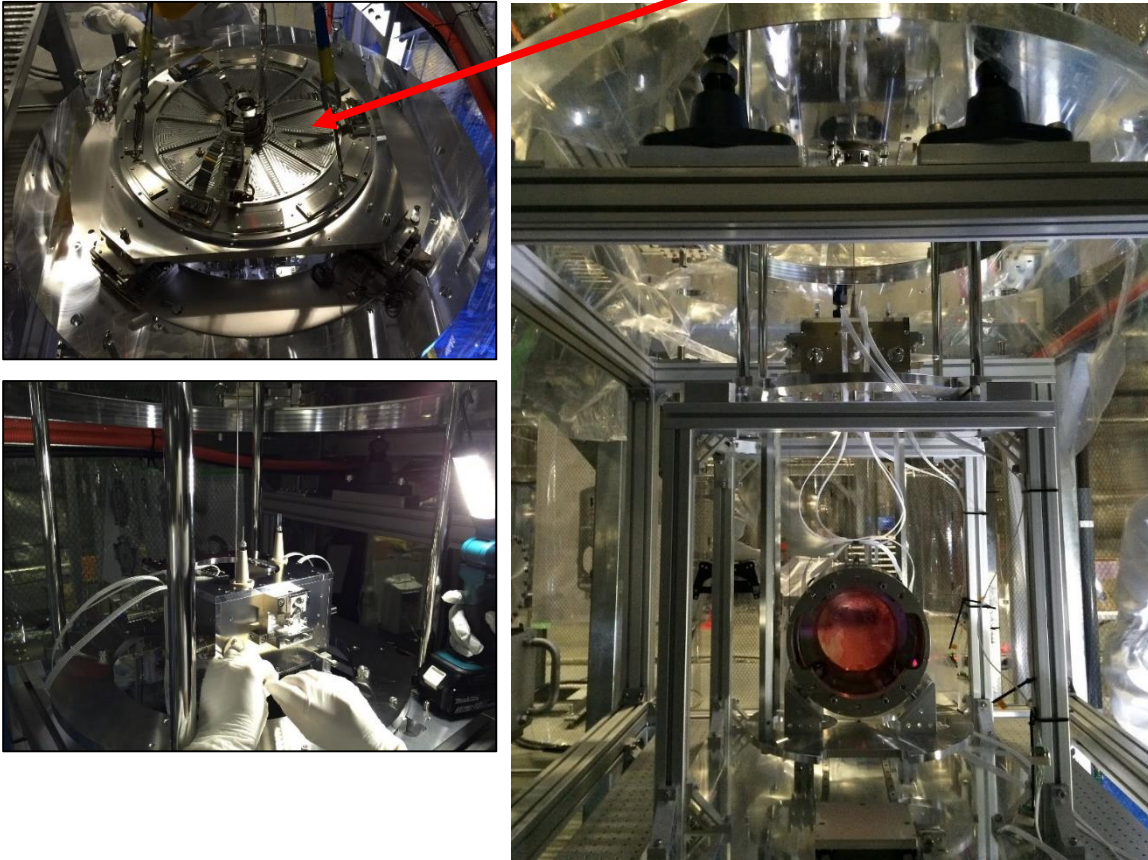
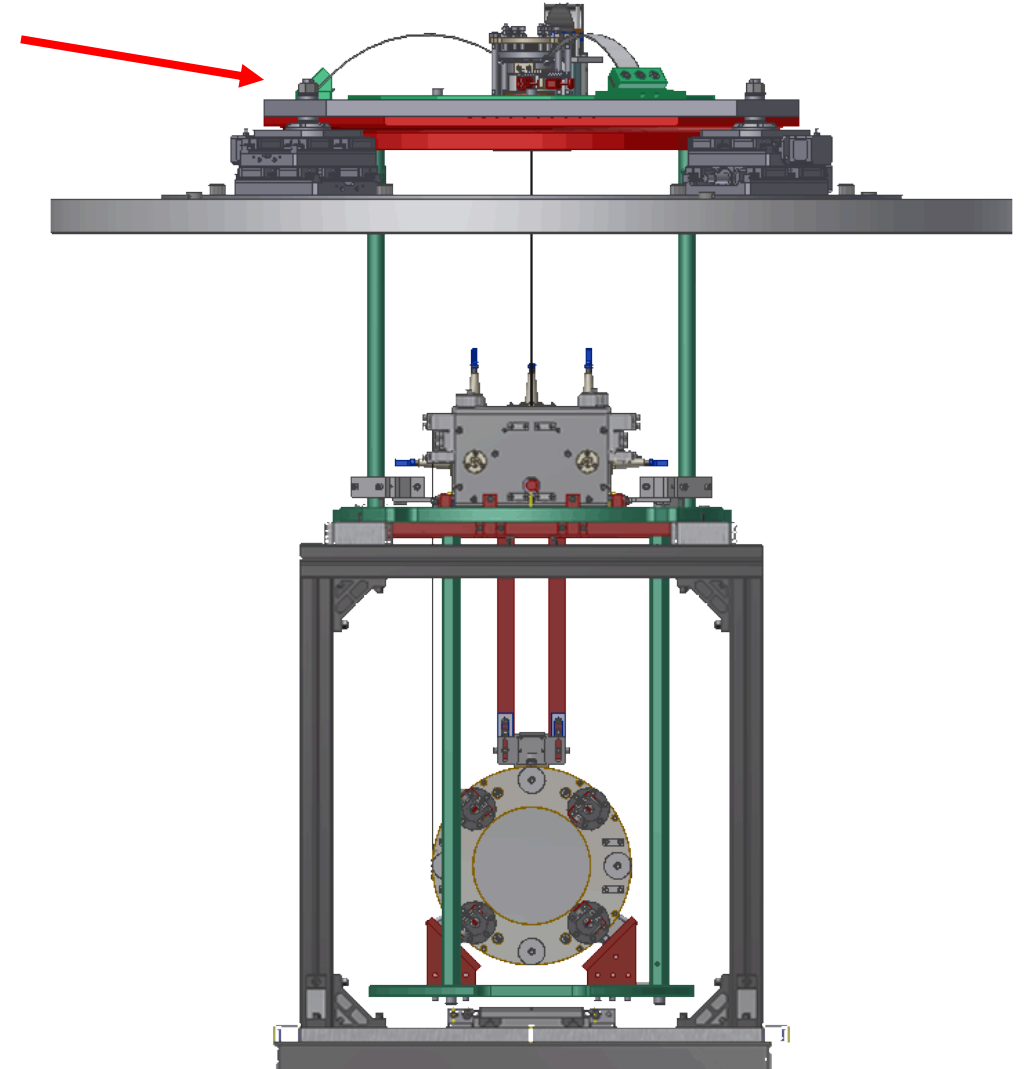


セキュリティ
フレーム

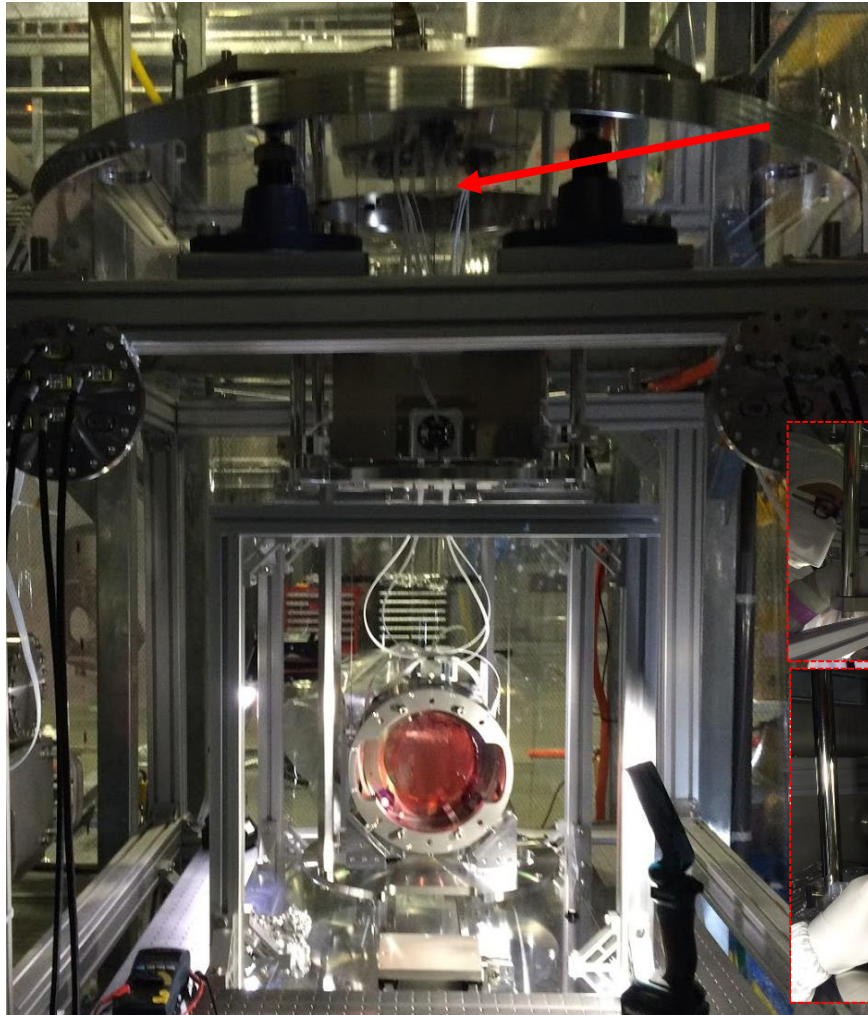


❖ Installation / 組み立て

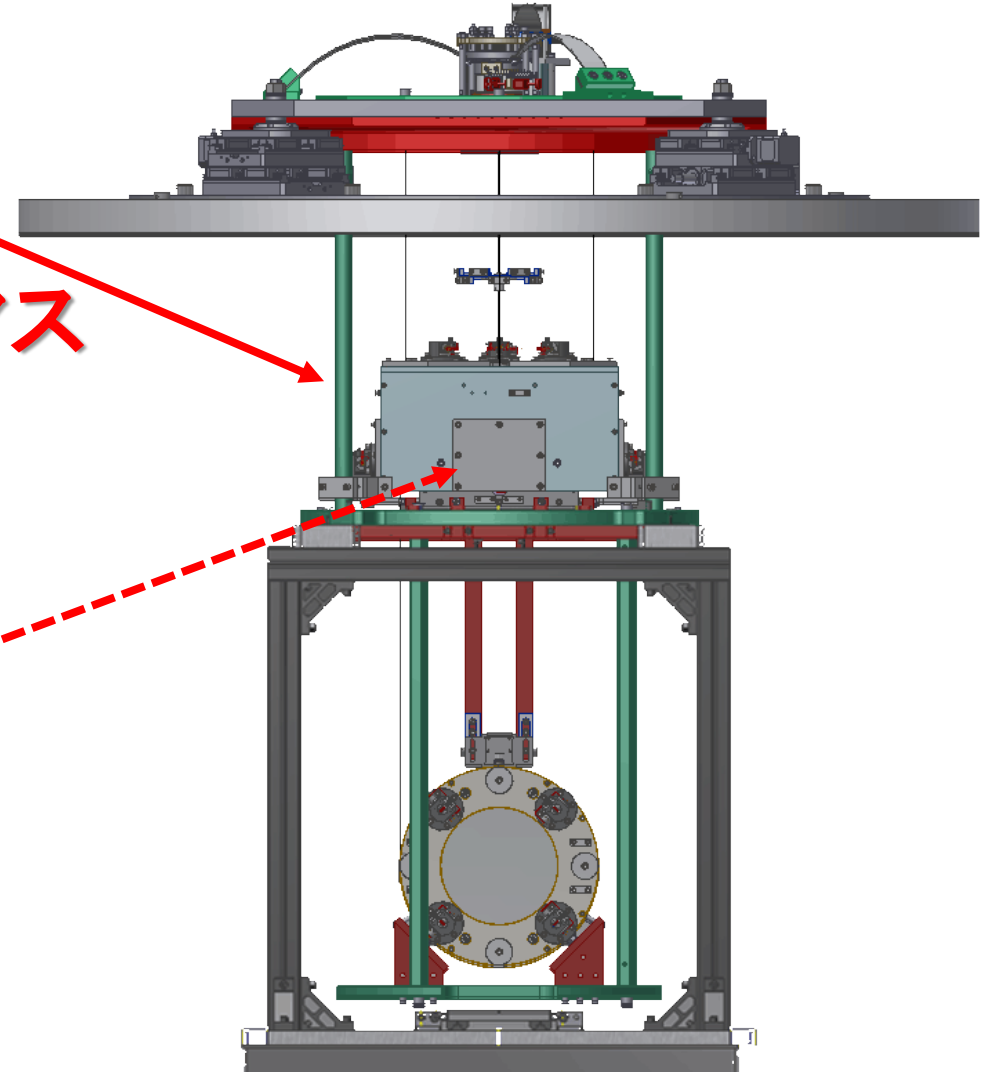
GAS filter



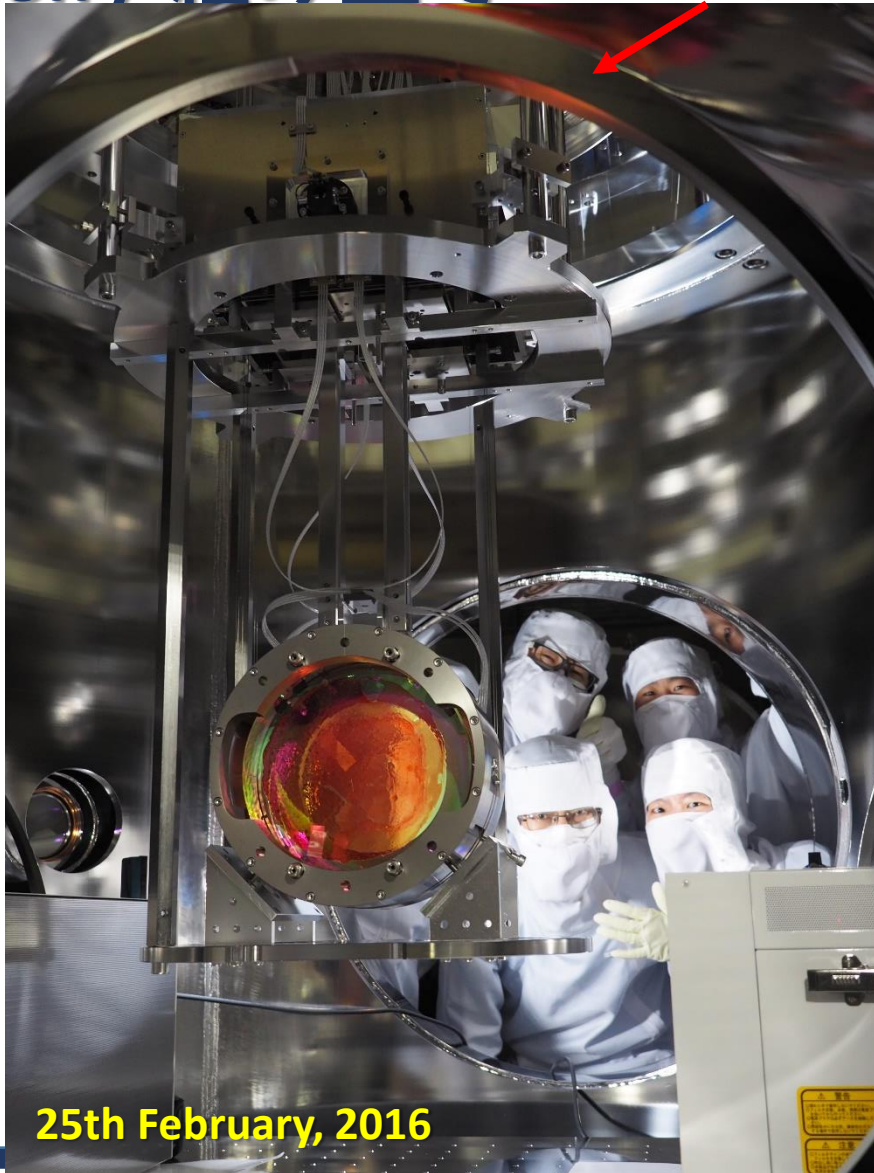
❖ Installation / 組み立て



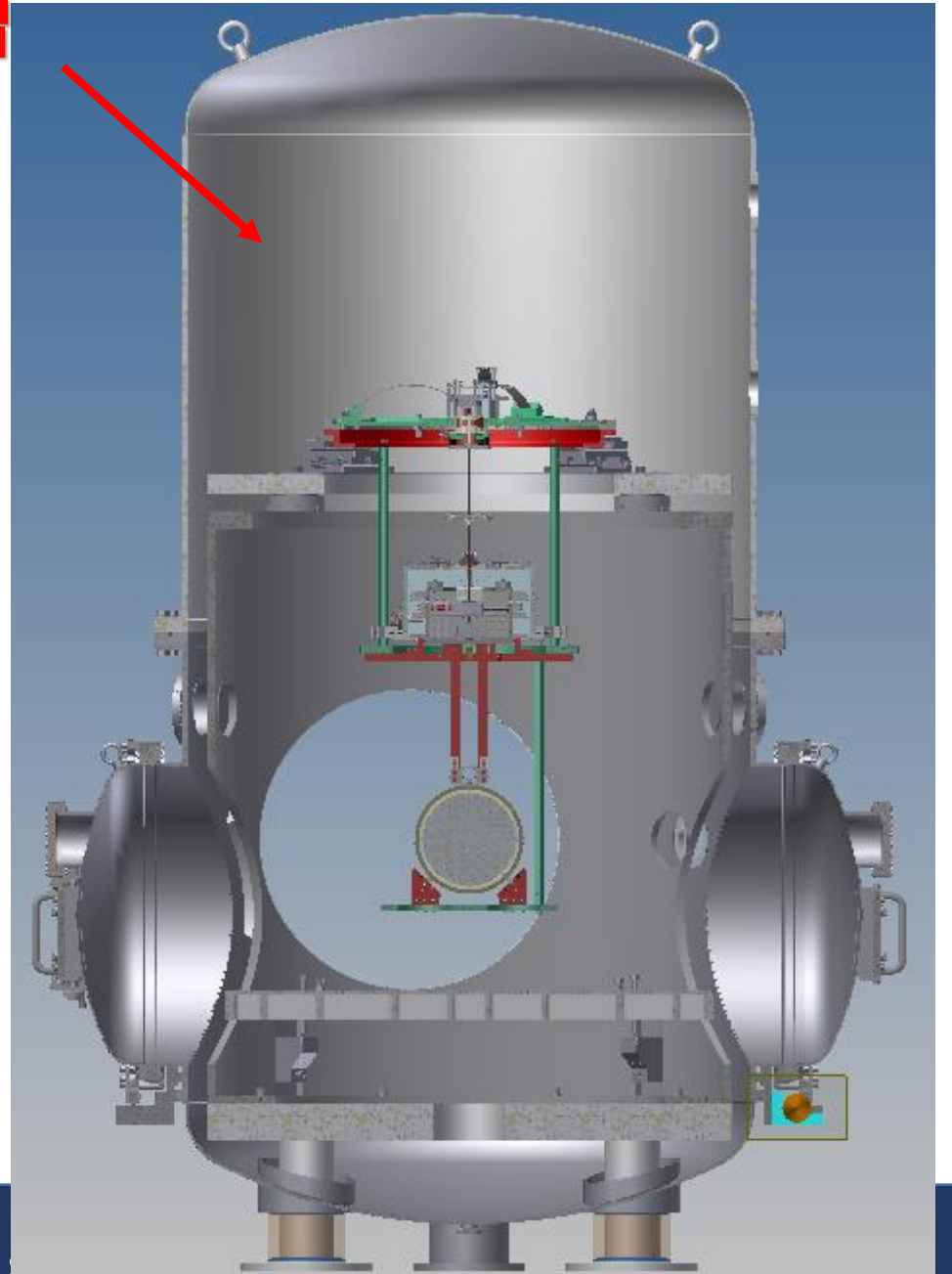
中段
リコイルマス



❖ Installation / 組み立て 真空槽

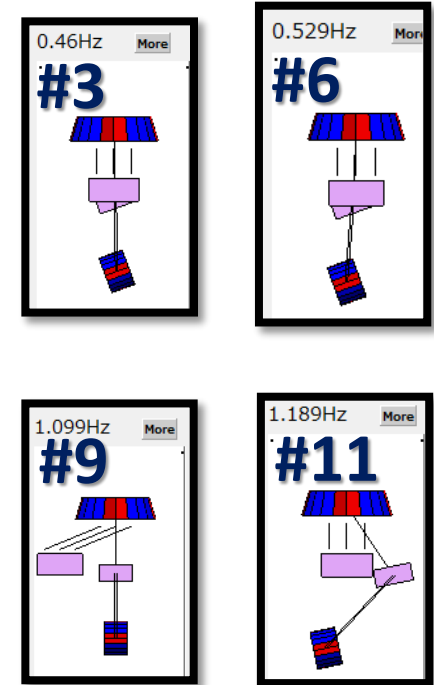
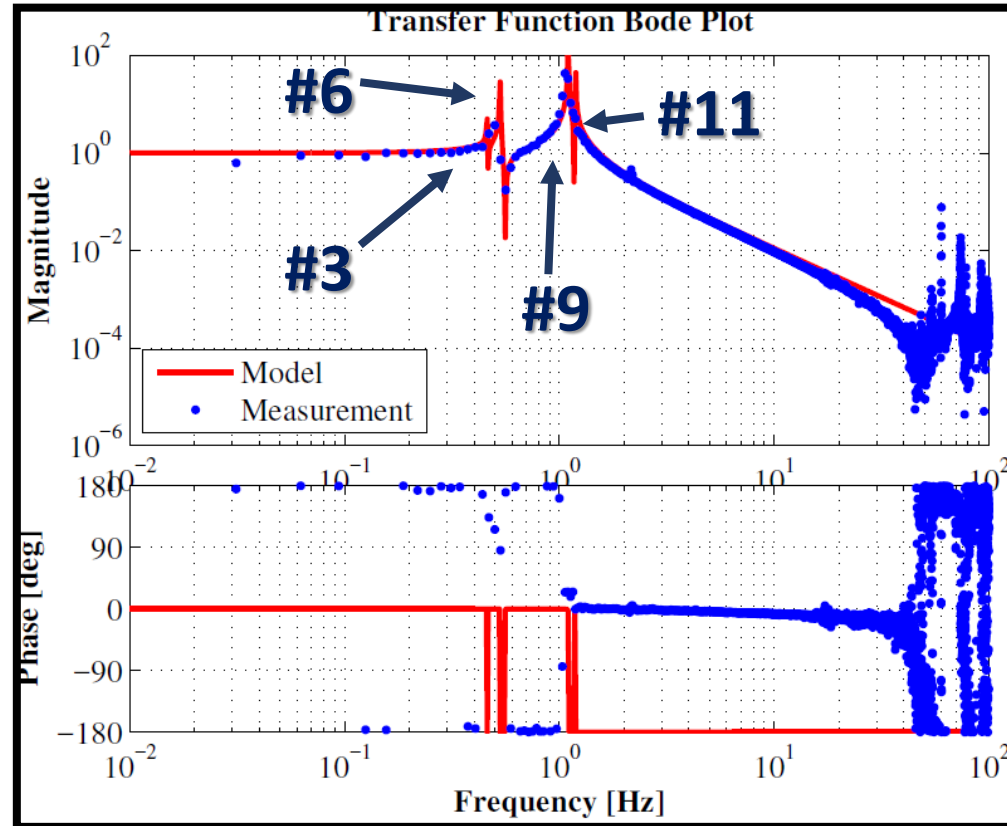
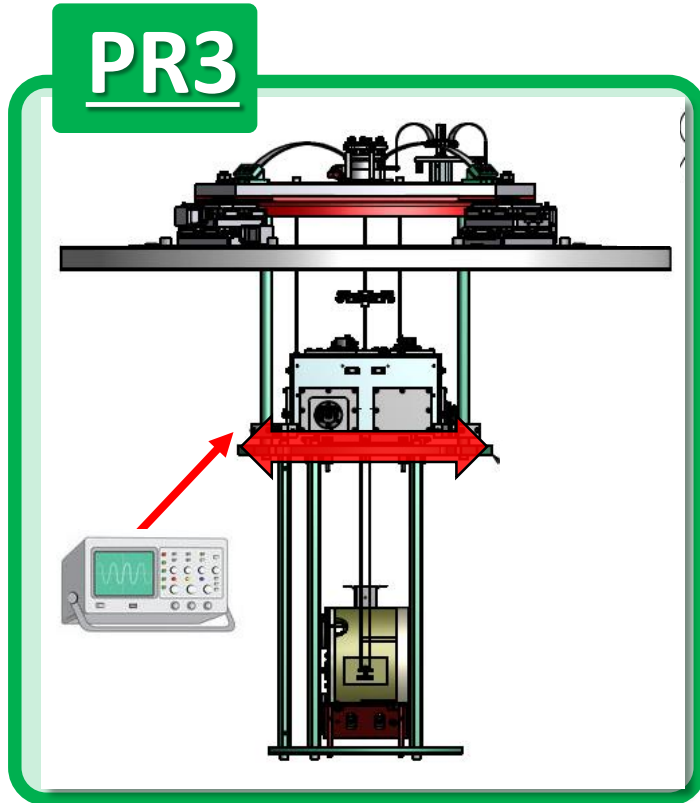


25th February, 2016



❖ Installation

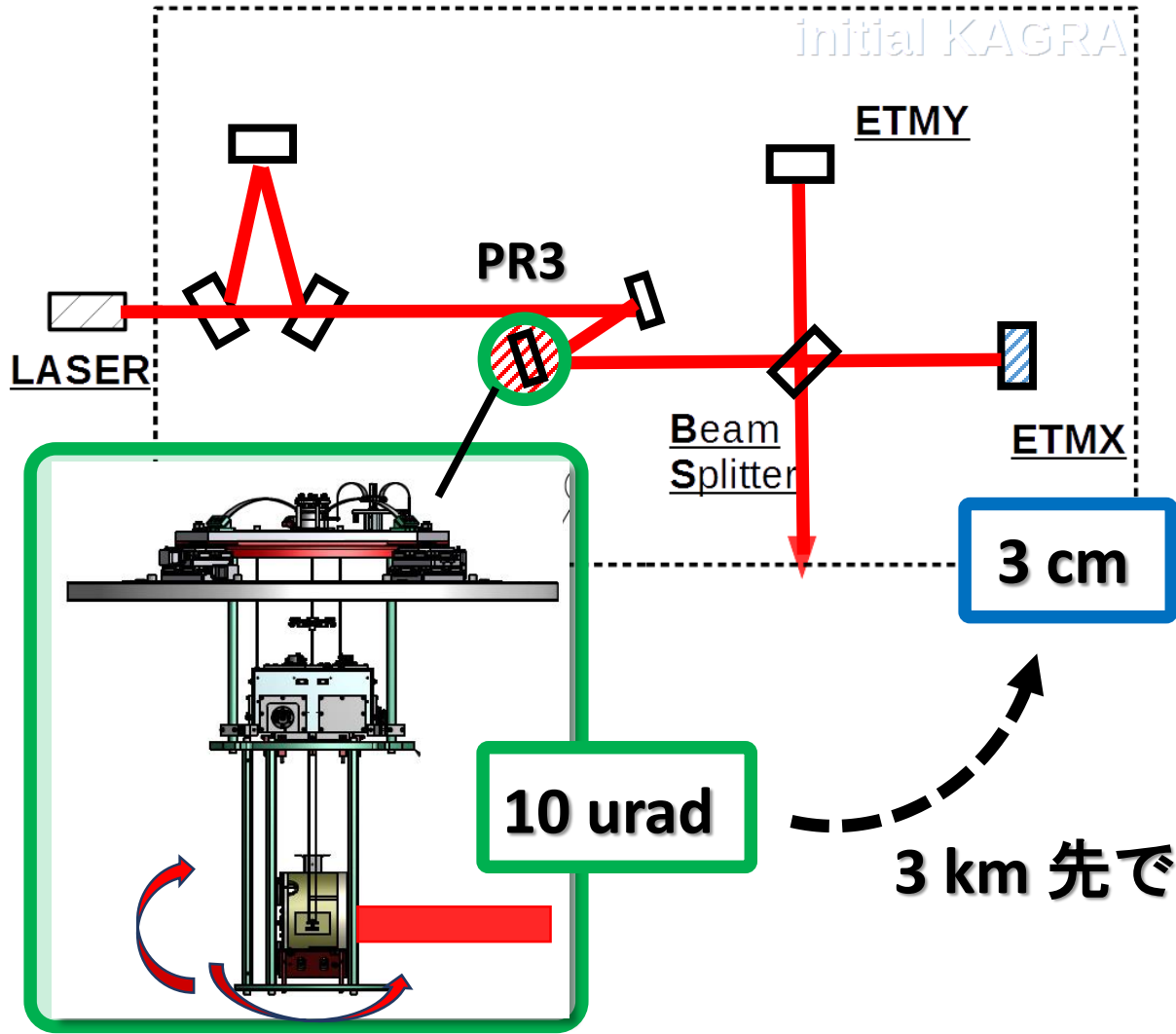
* PR3 鏡とその防振装置のインストール後 → $\left(\begin{array}{l} \text{力変位伝達関数} \\ \text{スペクトル} \\ \text{etc} \end{array} \right)$ を測定。



適切に懸架されているかの確認。

◆ 干渉計での役割

PR3 鏡 → 3 km 先に光を通すための調整用鏡



Traverser, picomotor : 初期アライメント

↓
中段マスのOSEM : ダンピング制御
+
鏡の姿勢の微調整

PR3 鏡が揺れる (振り子の共振)
→ 3 km 先でビームスポットが大きく動く
→ PR3 鏡が揺れない状態が必要
→ 要PR3 のダンピング制御
(詳細 → 奥富 発表)

Summary

- ❖ iKAGRA干渉計のアライメント用の鏡(PR3鏡)とその防振装置を神岡KAGRAサイトにて組立てた。(2.25, 2016 に完了)
- ❖ その性能と制御の確認試験を実施。(→ 奥富 発表)

Next step

- ❖ bKAGRA に向けて、現 PR3 防振装置の評価(Q 値, 振動伝達測定)

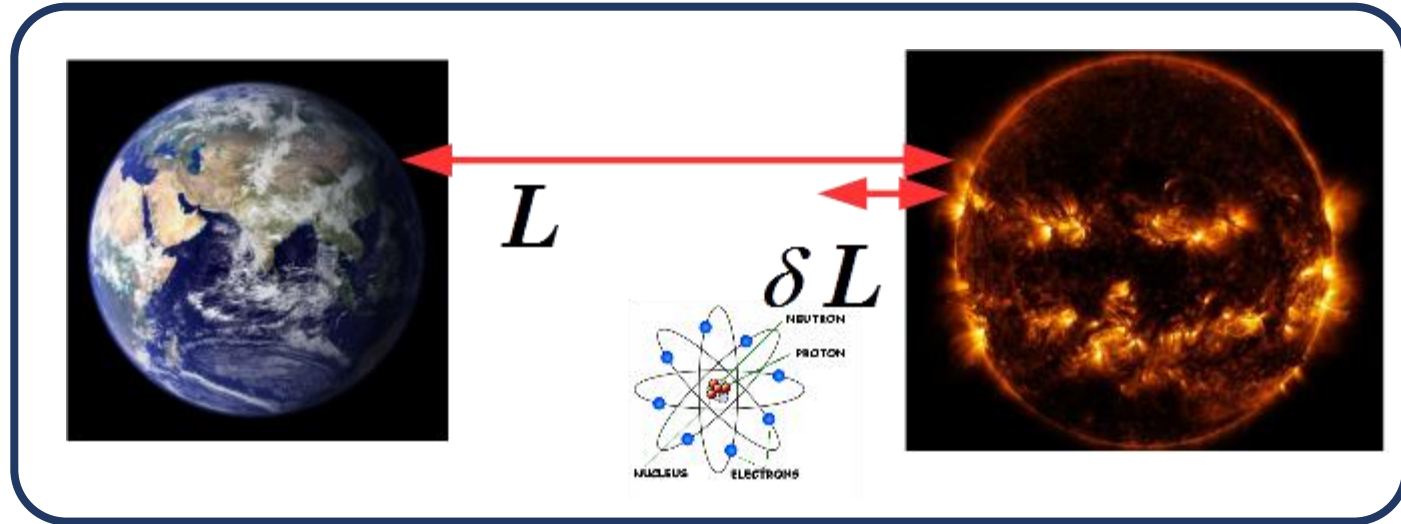
Thank you for your attention.

Back up

❖ はじめに：重力波



$$\text{重力波振幅 } h \sim \delta L / L$$

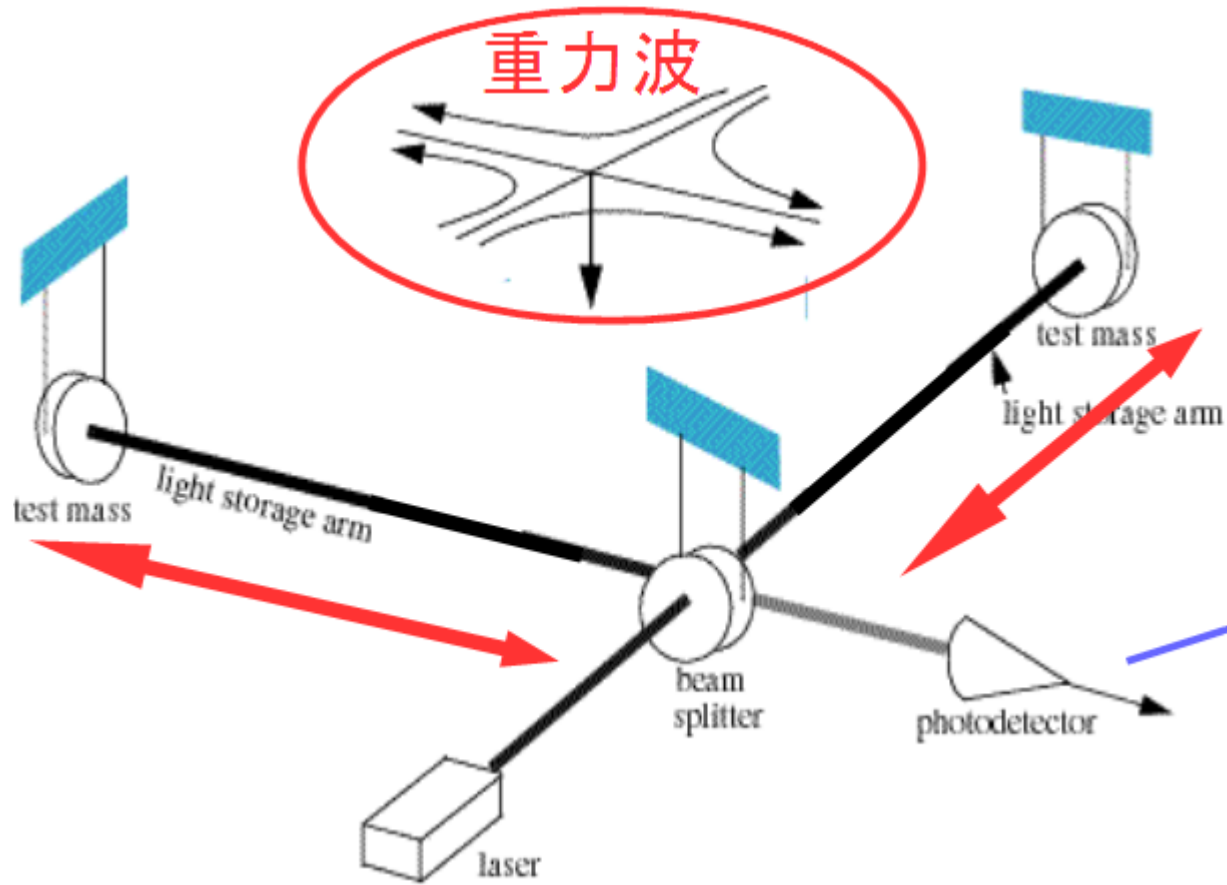


重力波による空間の歪み δL は非常に小さい。

Intro. of GW & GW detector

- 重力波は時空の歪み → 変位は非常に小さい → 干渉計で検出
- 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA では、
熱雑音の低減のため → 主要な鏡の冷却 (@ 20 K)
地面振動低減のため → 地下への干渉計の設置 を行う。
- 干渉計の鏡は外乱による振動を抑えるために懸架される。

❖ Background : 検出原理

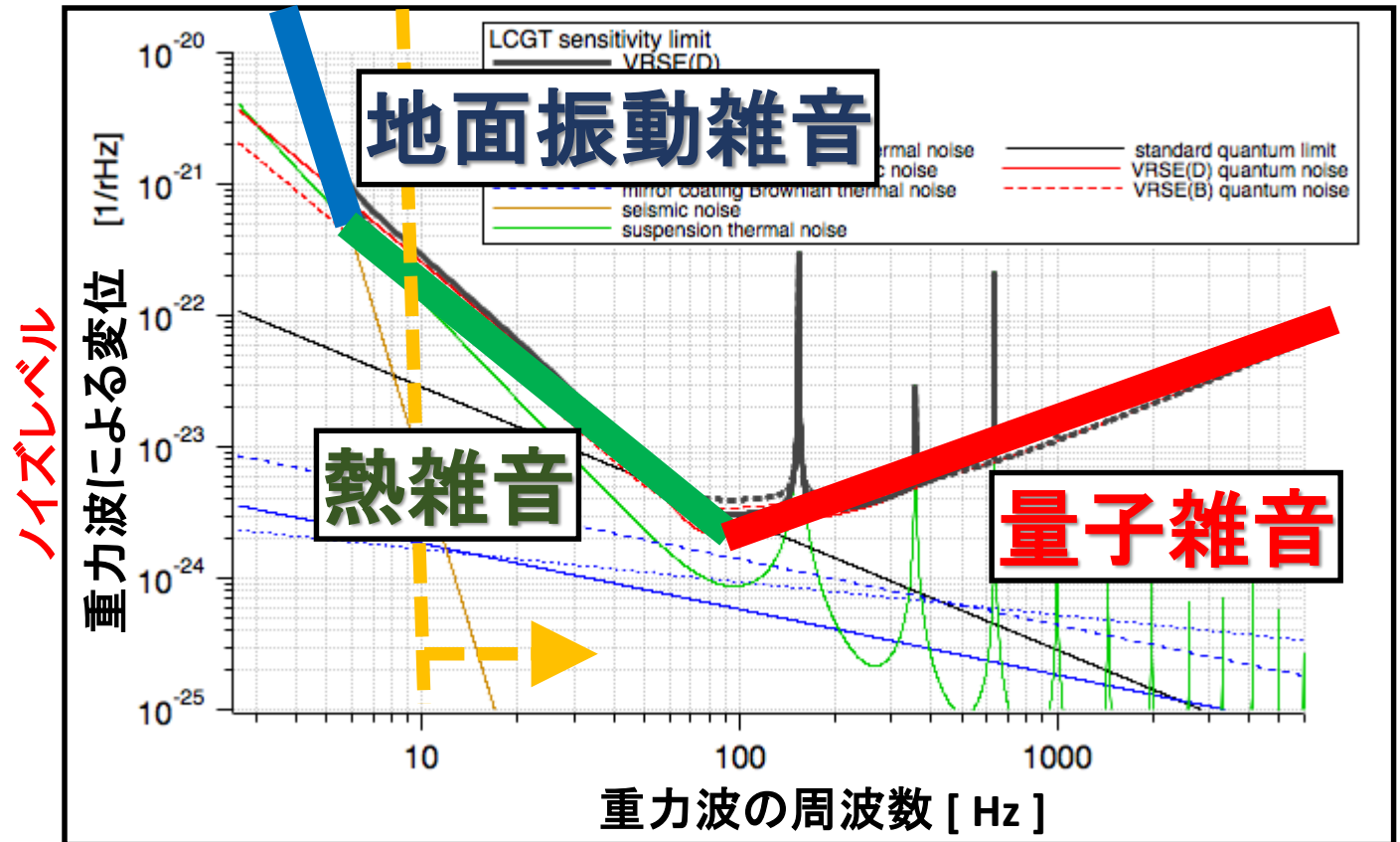


- ①重力波が到来
- ②光の位相が変化
- ③干渉により
光の明暗が変化
- ④重力波信号

❖はじめに：重力波検出器 / KAGRA

重力波信号は
非常に小さい。

→多々ある雑音
(鏡を揺らす原因)を
いかに除去するか。



KAGRA の目標ノイズレベル

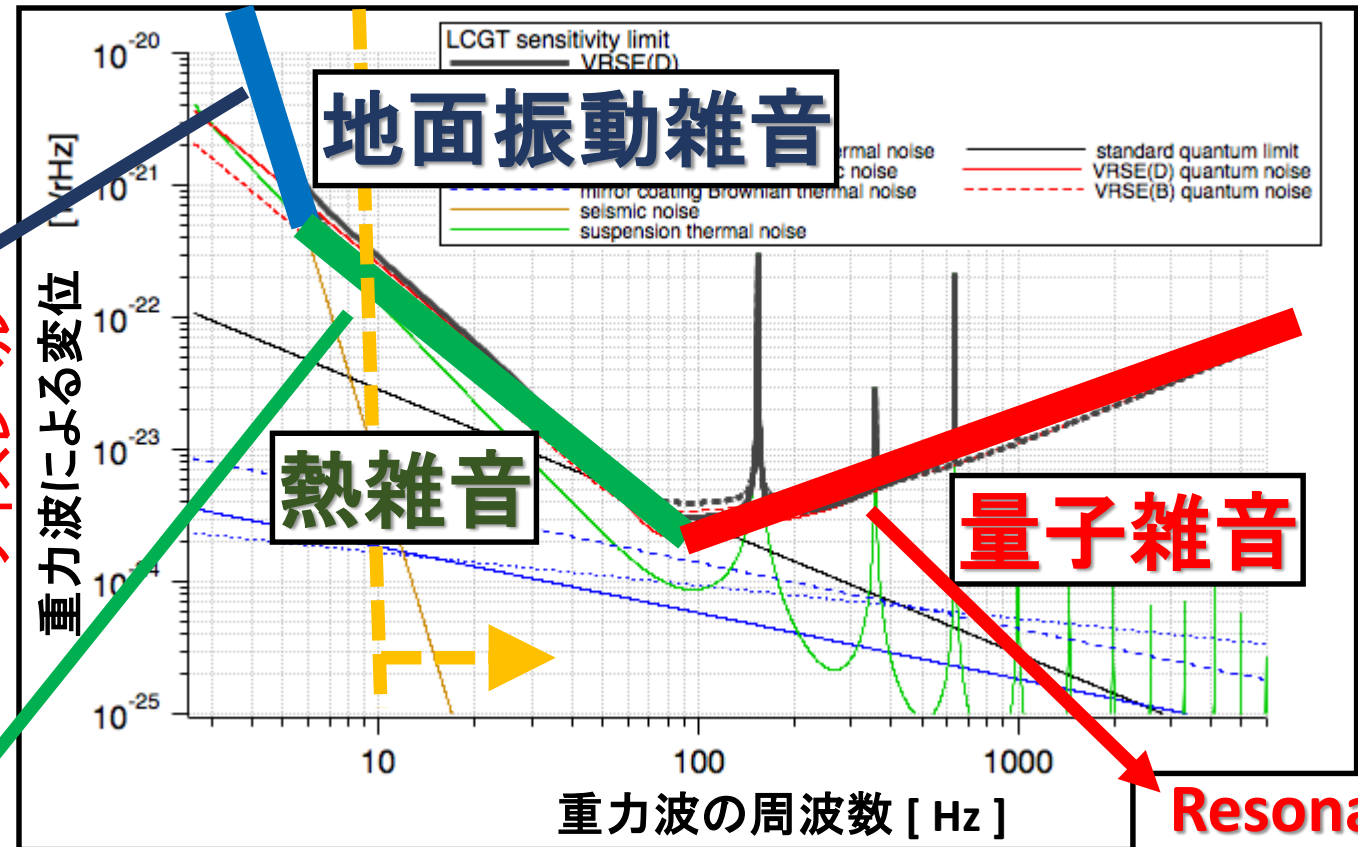
◆はじめに：重力波検出器 / KAGRA

雑音への対策；

懸架装置 & 地下への設置



Cryogenic Techniques



KAGRA の目標ノイズレベル

Resonant
Sideband
Extraction

◆はじめに：重力波検出器 / KAGRA

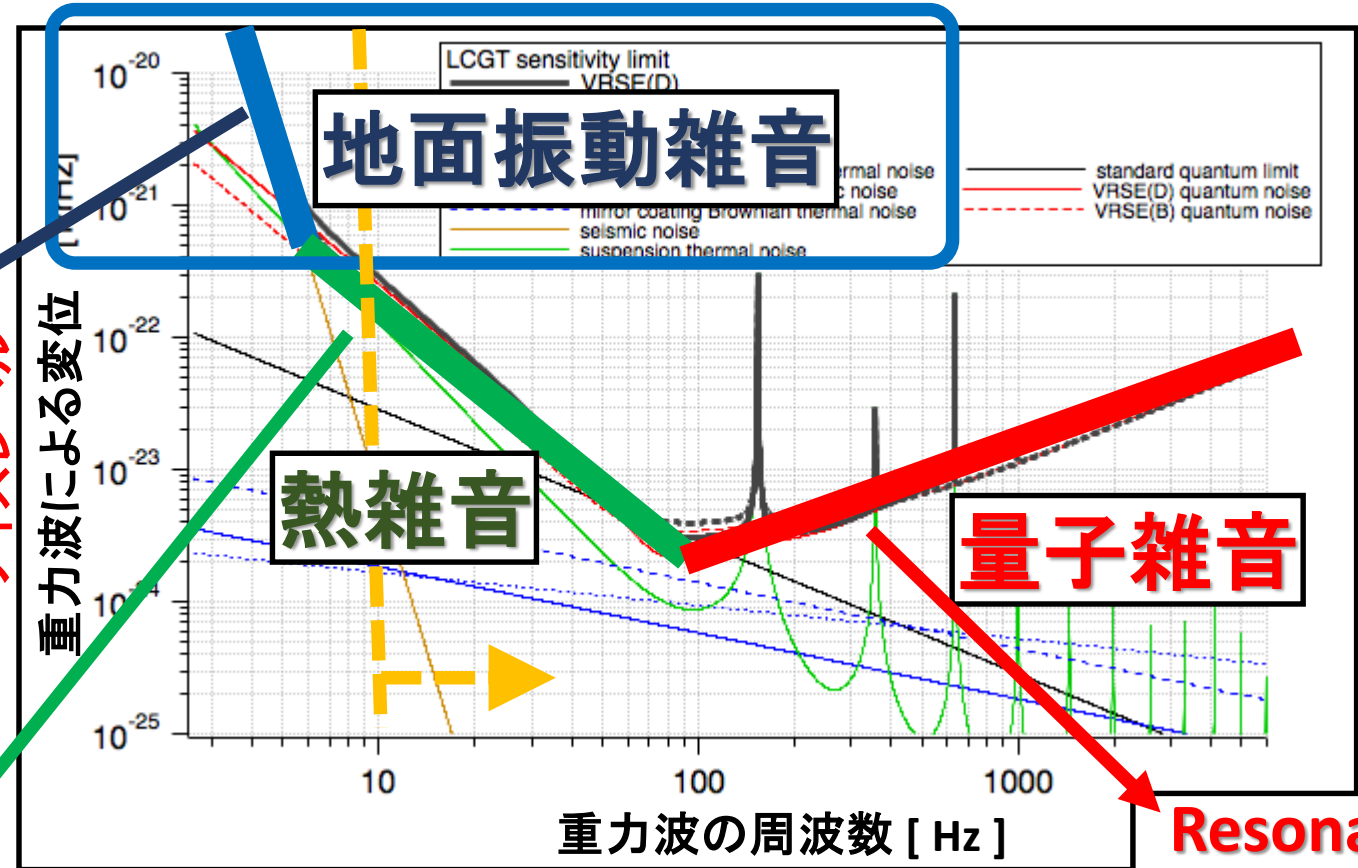
雑音への対策；

常温

懸架装置 & 地下への設置



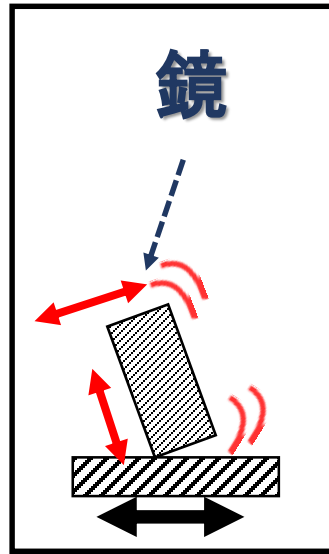
Cryogenic Techniques



KAGRA の目標ノイズレベル

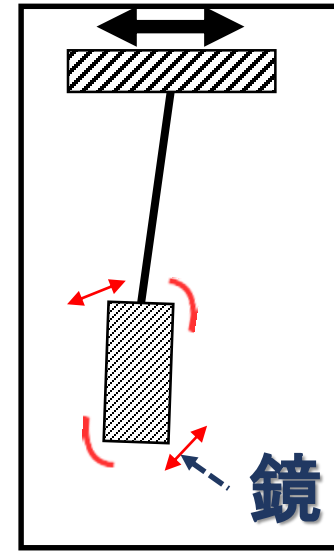
Resonant
Sideband
Extraction

◆はじめに：懸架装置の役割



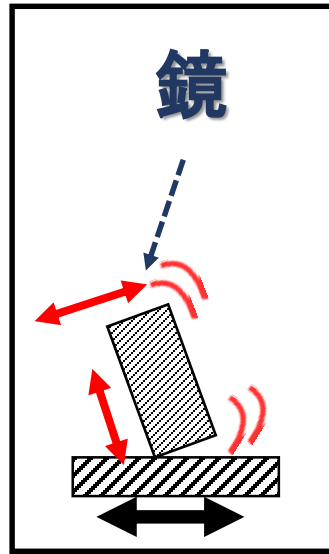
地面に置く

地面振動により
鏡は大きく揺れる。
(自由質点でなくなる)



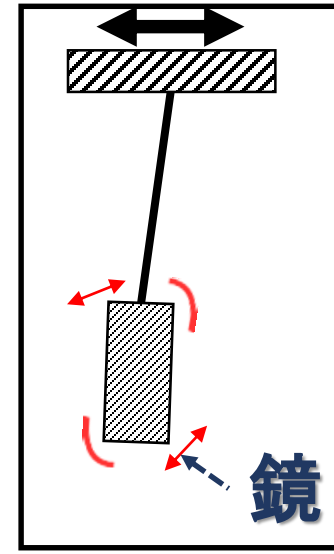
懸架する。

◆はじめに：懸架装置の役割



地面に置く

地面振動により
鏡は大きく揺れる。
(自由質点でなくなる)

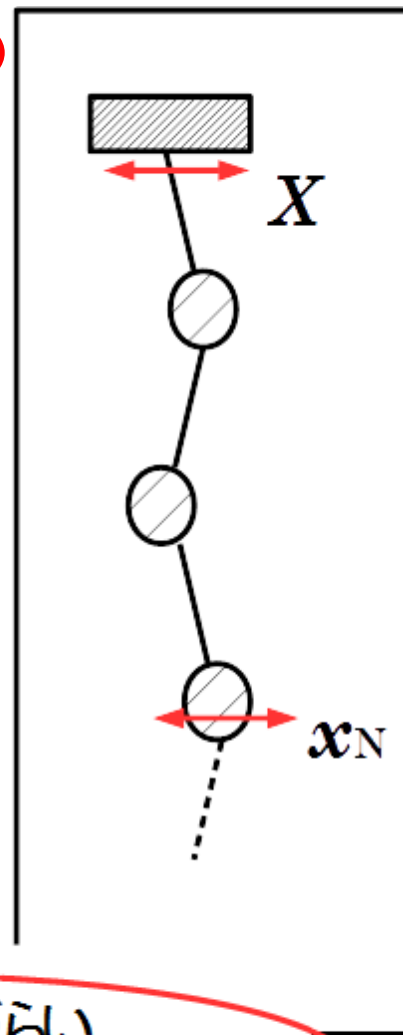
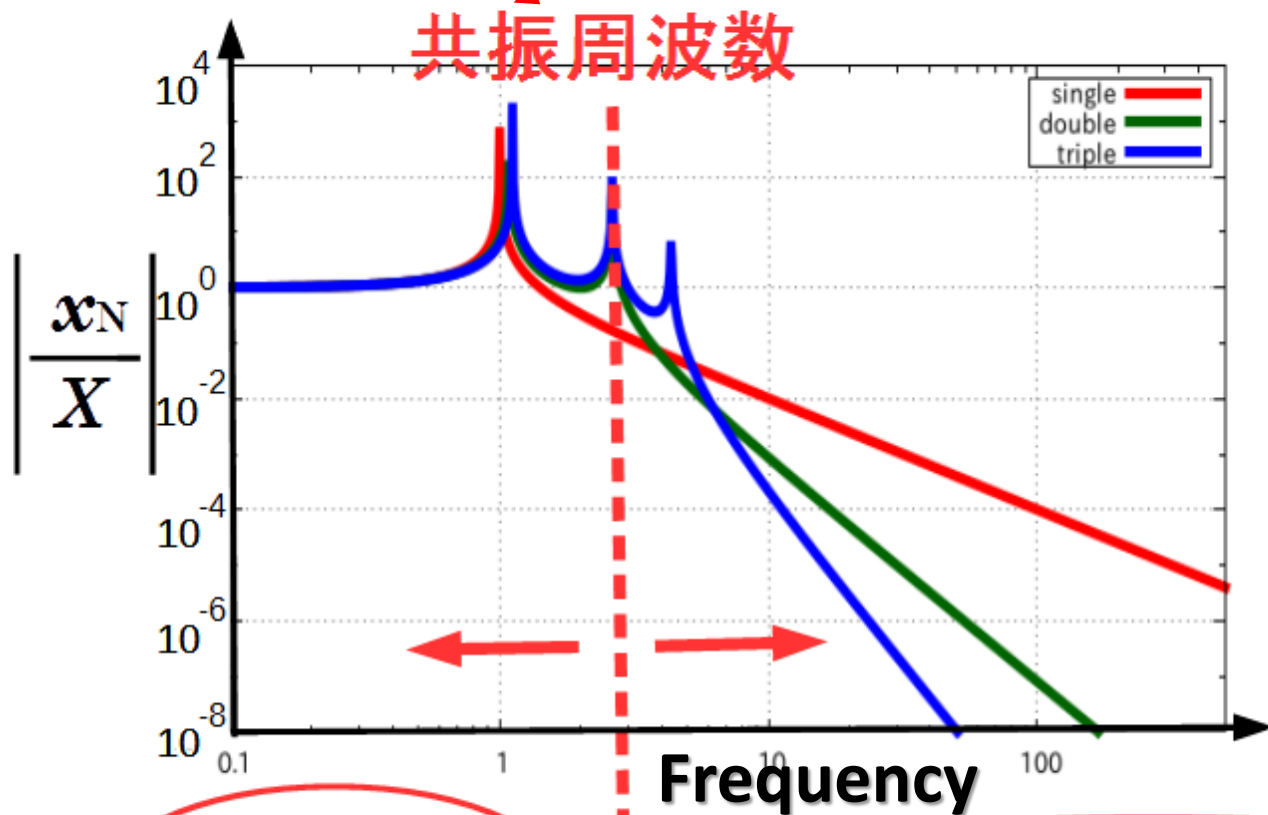


懸架する。

共振周波数より
高い周波数では
揺れにくくなる。

◆はじめに：懸架装置

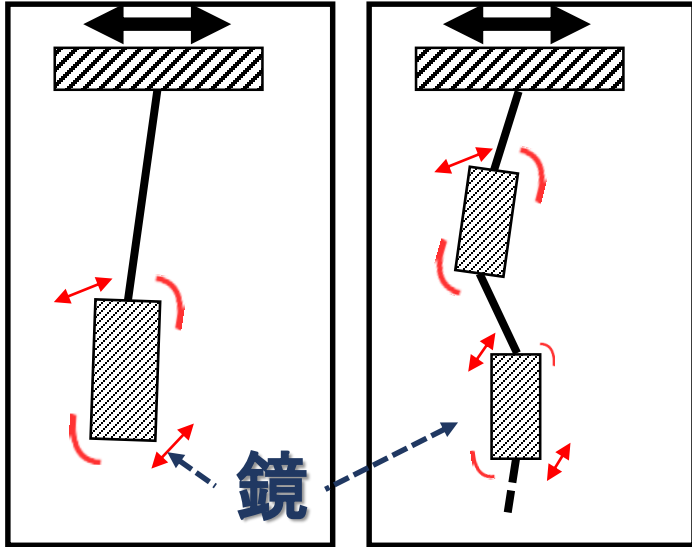
一番大きく揺れる



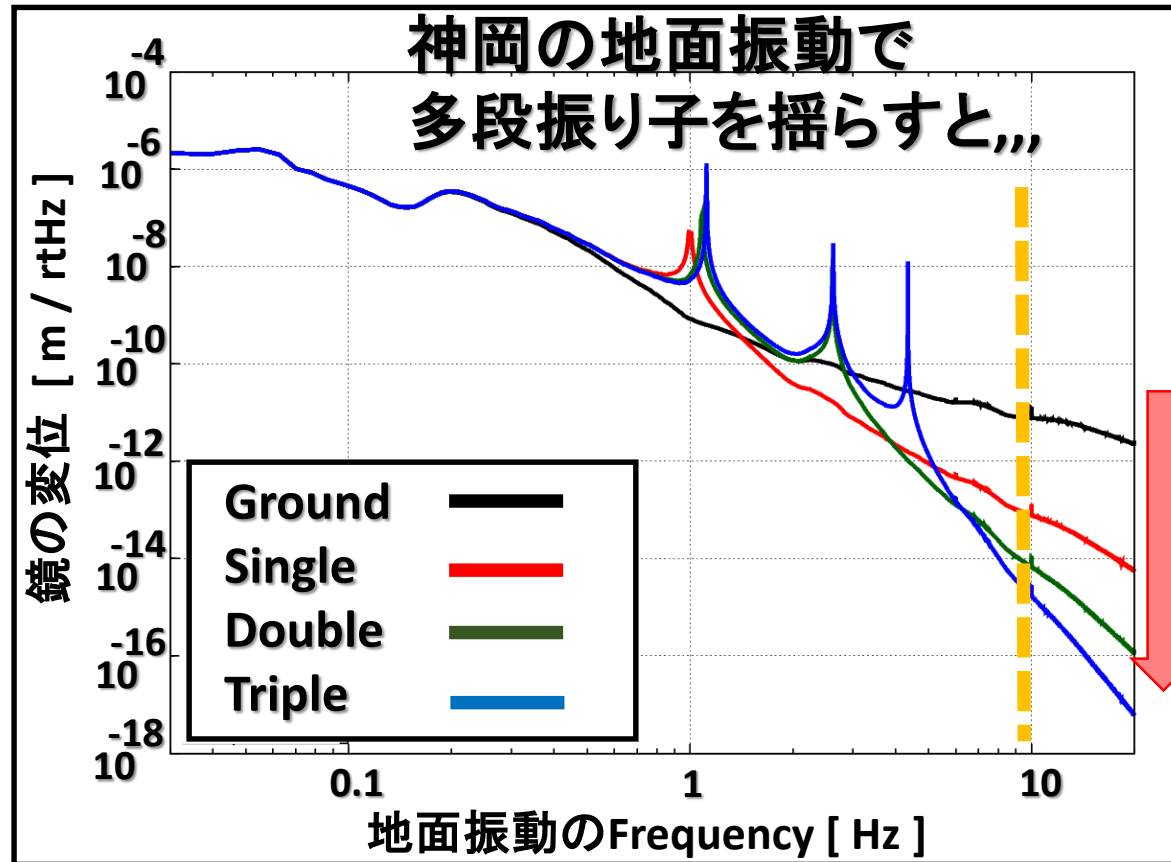
低周波では鏡は大きく揺れる

高周波では揺れづらい
段数が多いとより揺れなくなる

◆はじめに：懸架装置の役割



多段振り子として
懸架する。

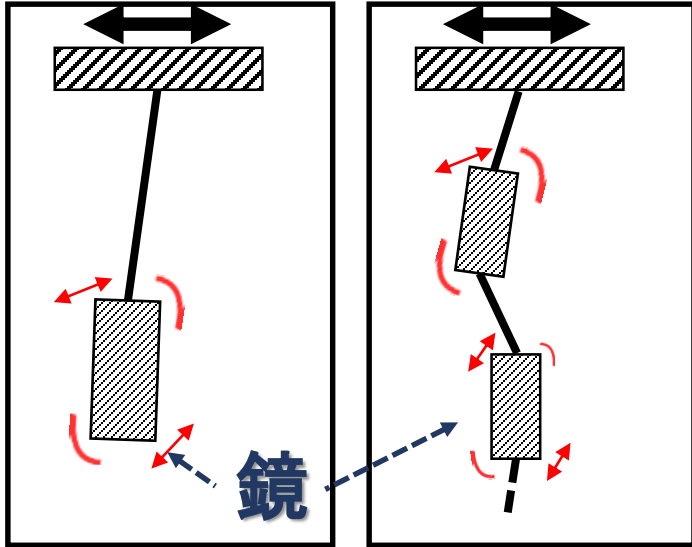


観測帯域の 10 Hz 以上では揺れにくくなる。

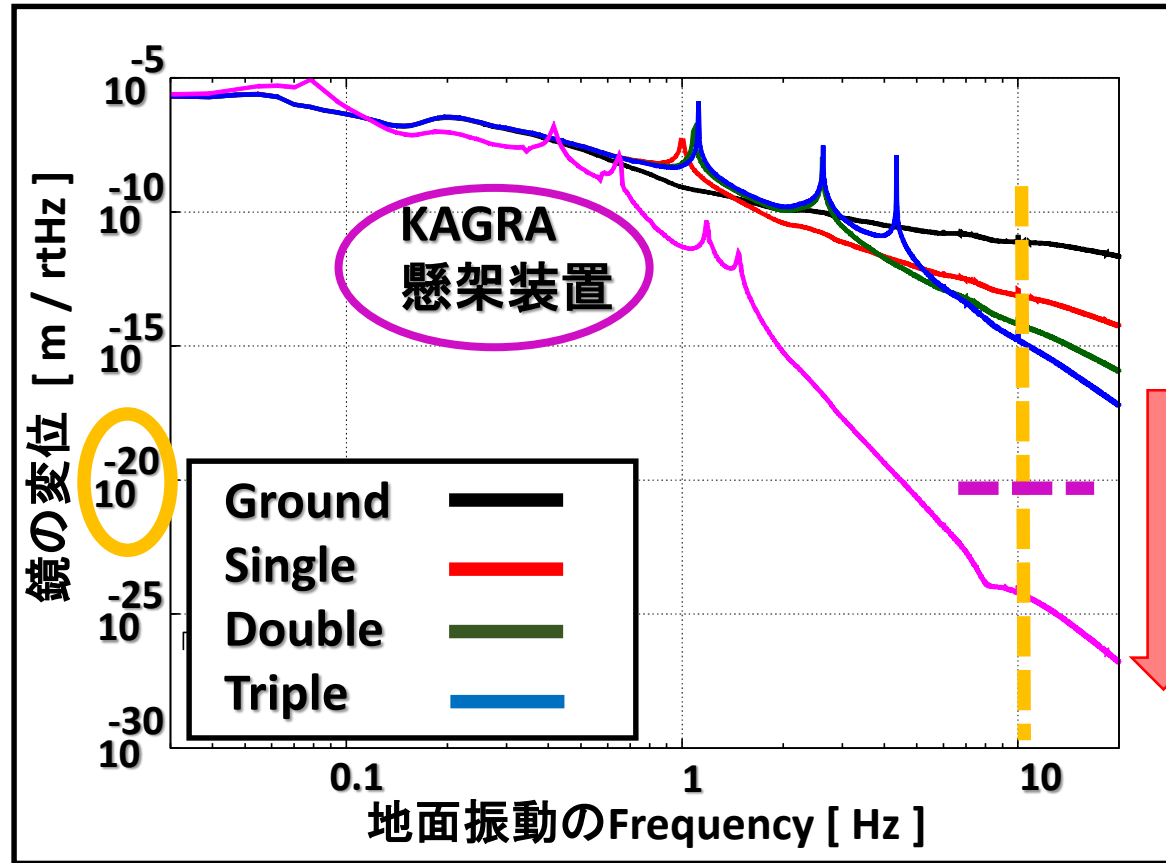
要求値

観測帯域の下端
10 Hz にて
鏡の揺れはおよそ
 2×10^{-20} m/rtHz
以下。

◆はじめに：懸架装置の役割 (例えば Beam Splitter の場合)



多段振り子として
懸架する。



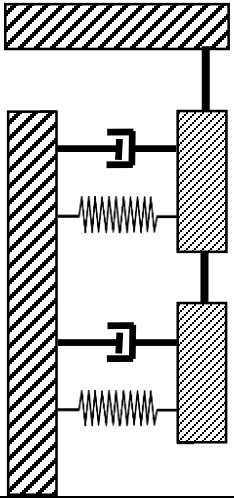
観測帯域の 10 Hz 以上では揺れにくくなる。
(ただし、Peak が出てくる。)

要求値

観測帯域の下端
10 Hz にて
鏡の揺れはおよそ
 2×10^{-20} m/rtHz
以下。

防振比を
高めるために
→ 5 段振り子
を使用。

◆はじめに：懸架装置の役割



懸架により揺れにくくしても、
共振周波数で大きく揺れてしまう。
→ 鏡の振動を抑えたい。(より素早く)

damping が必要

① Passive damping

Mechanicalに減衰項を増やす。

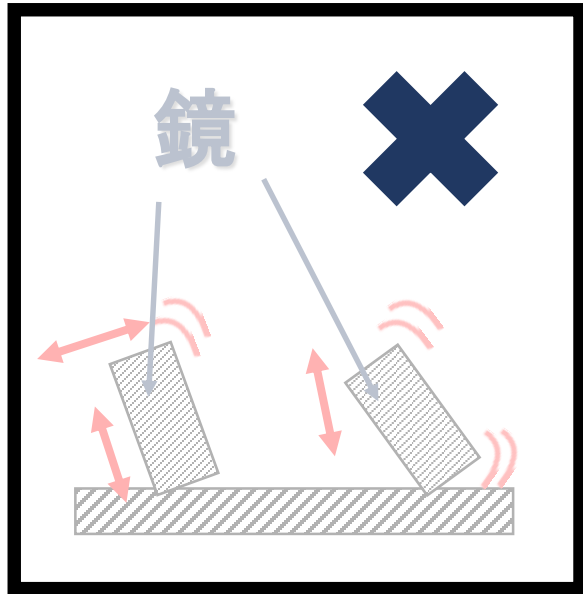
※高周波数帯 (= 観測帯域)
で防振比を損なう。

② Active damping

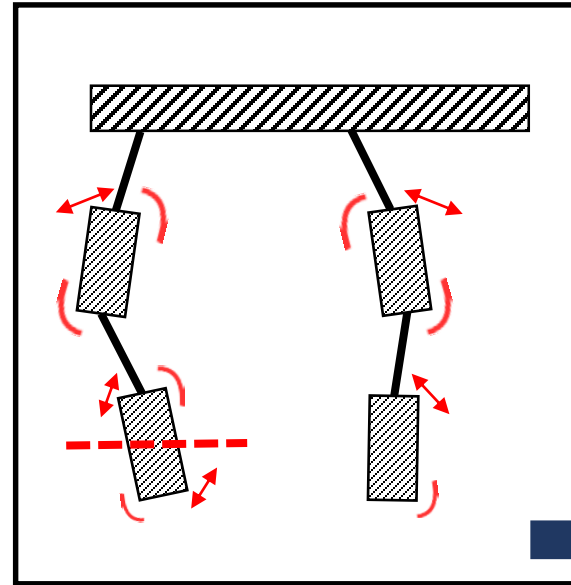
Sensor / Actuator を使った**Feedback** 制御

※Sensor / Actuator 雑音が加わる。

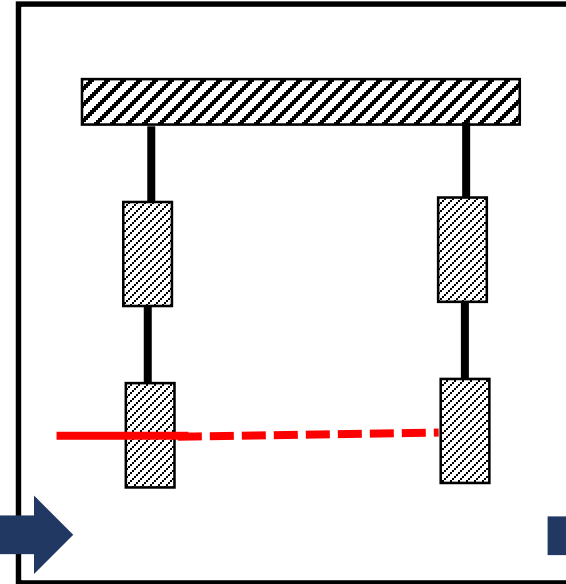
◆はじめに：防振(懸架)装置の役割



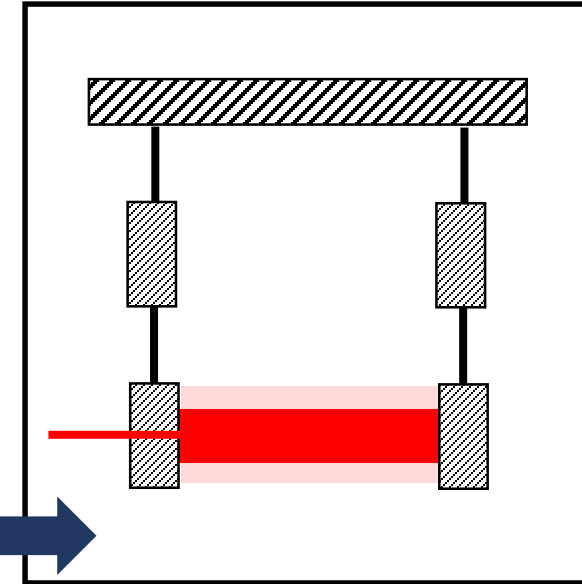
地面に置く



懸架する



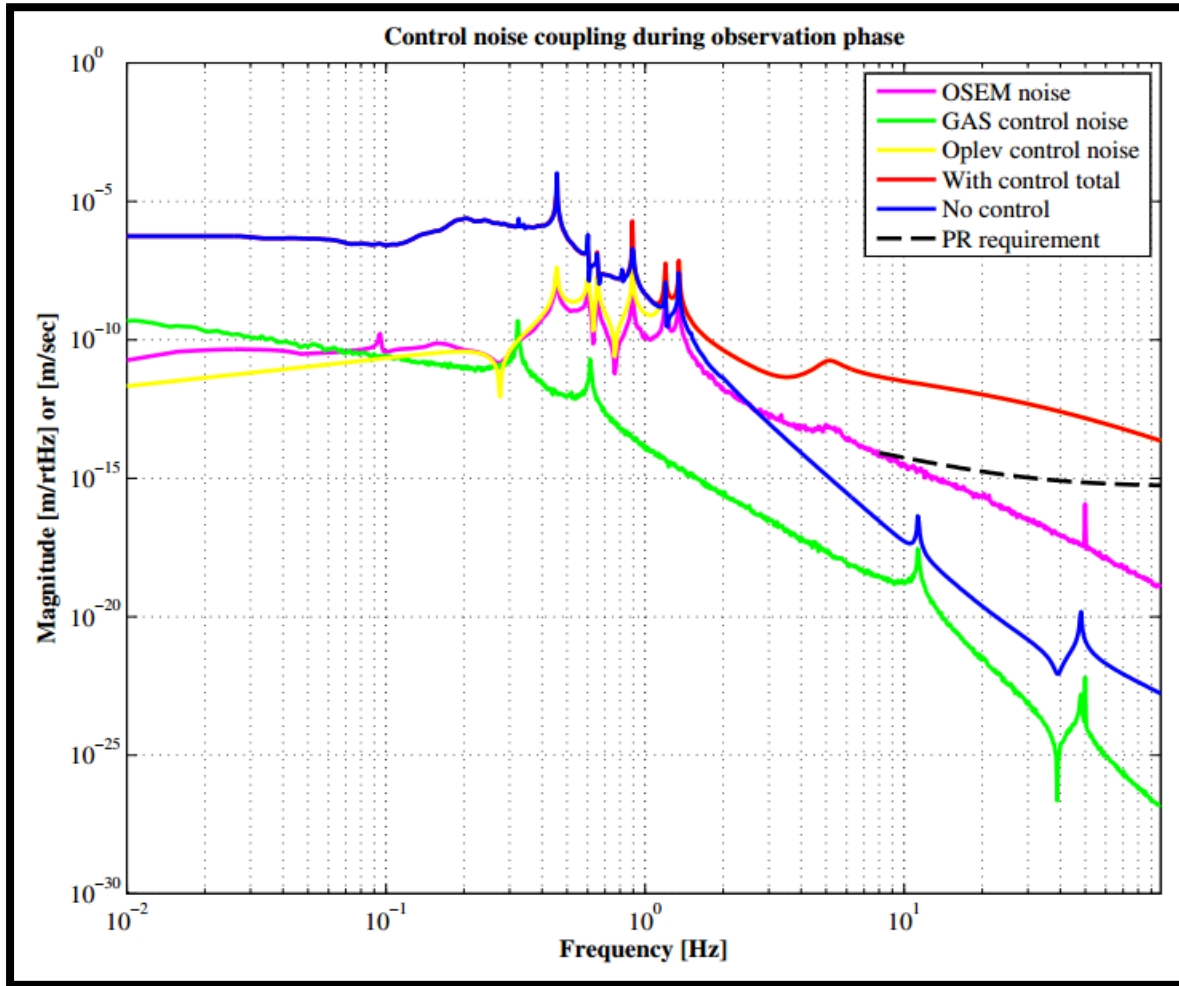
Active
Damping



Observation

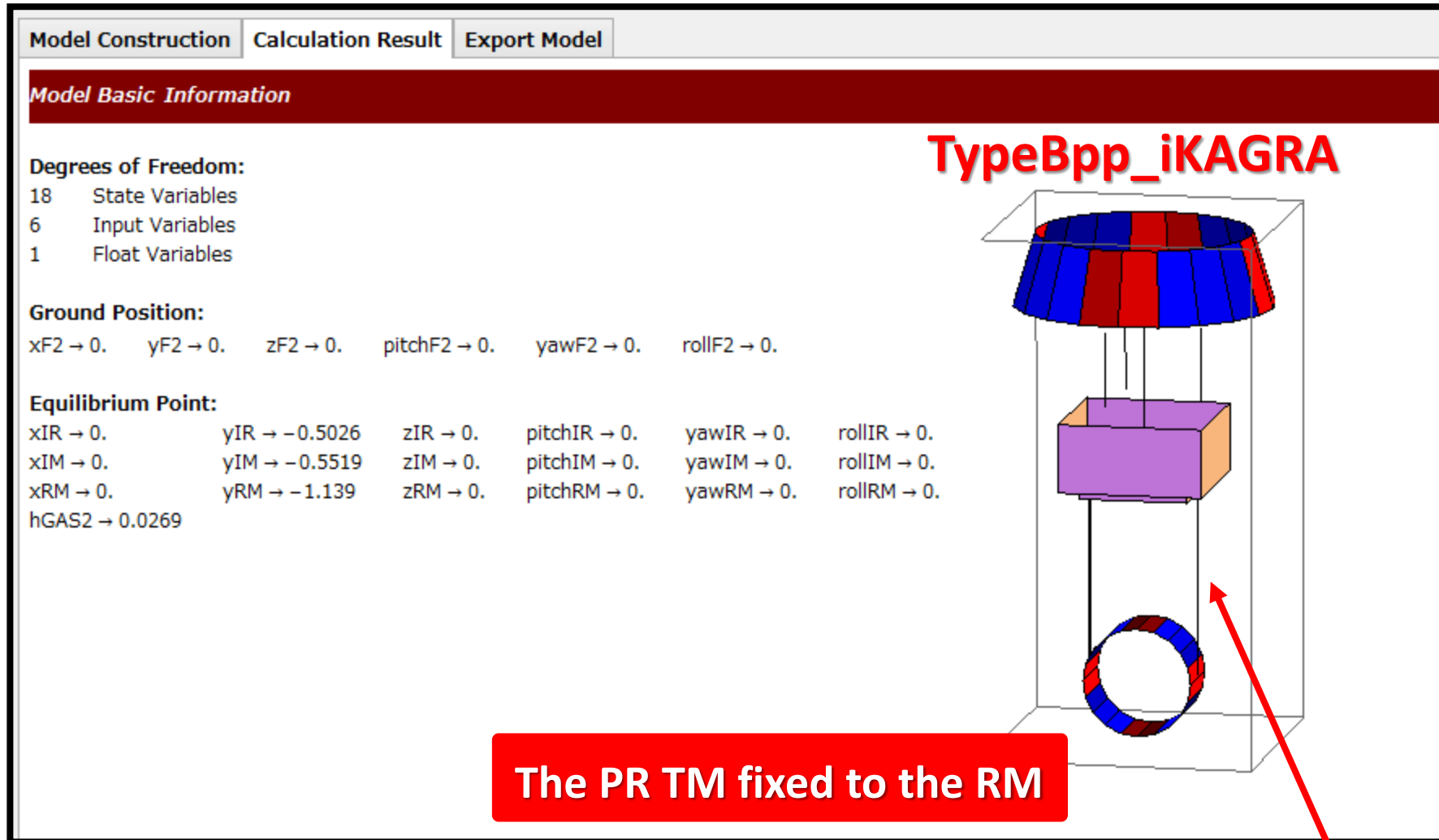
→ 外乱によって鏡が大きく揺れることを防ぐ。 = 懸架装置の役割

❖はじめに：懸架装置



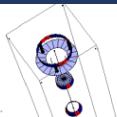
**Displacement noise and
Sensor noise couplings
of the TypeBp SAS**

① Measurement vs. SUMCON : TypeBpp_iKAGRA



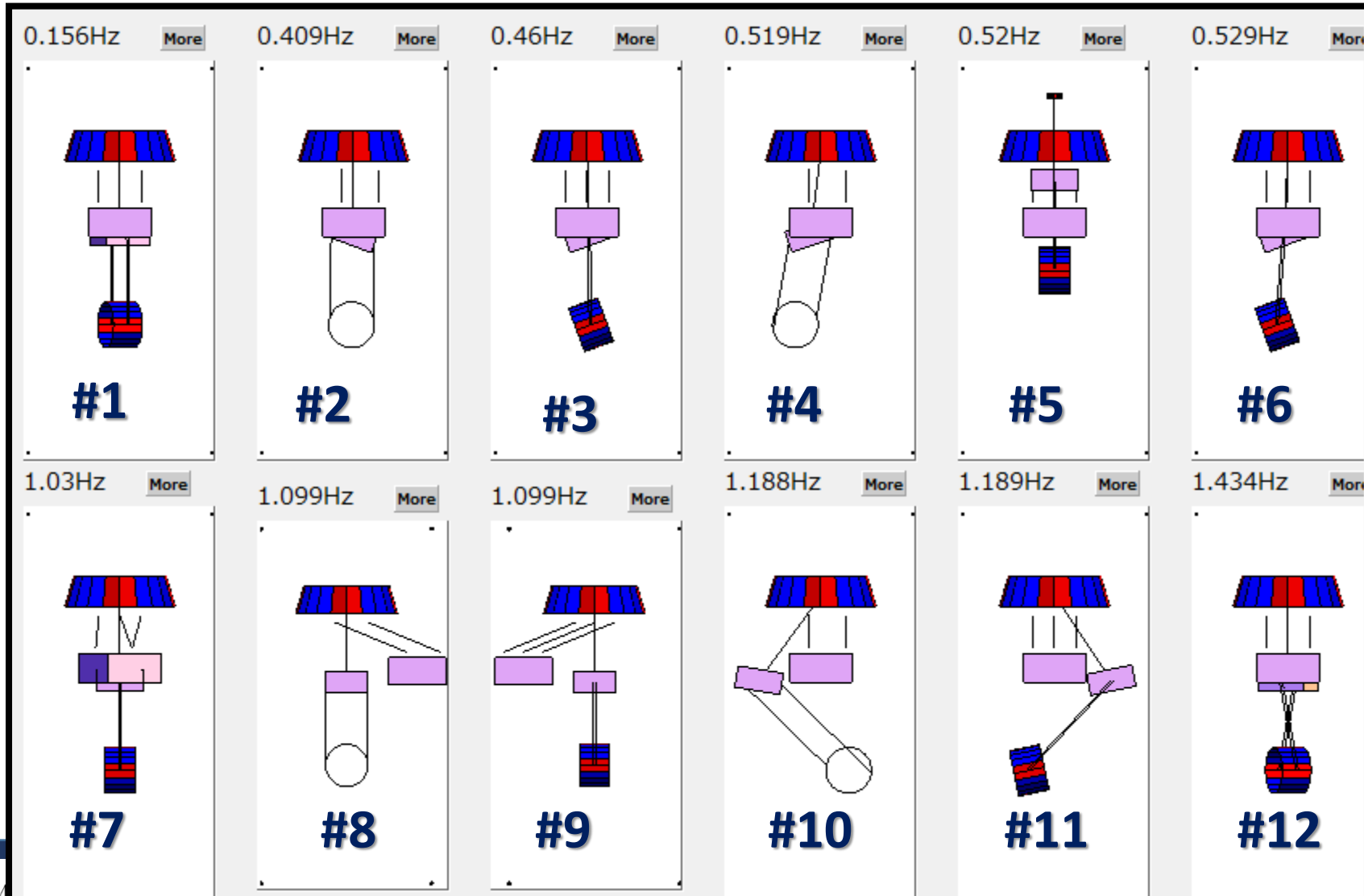
RM is suspended by 4 wires

Eigen Mode List



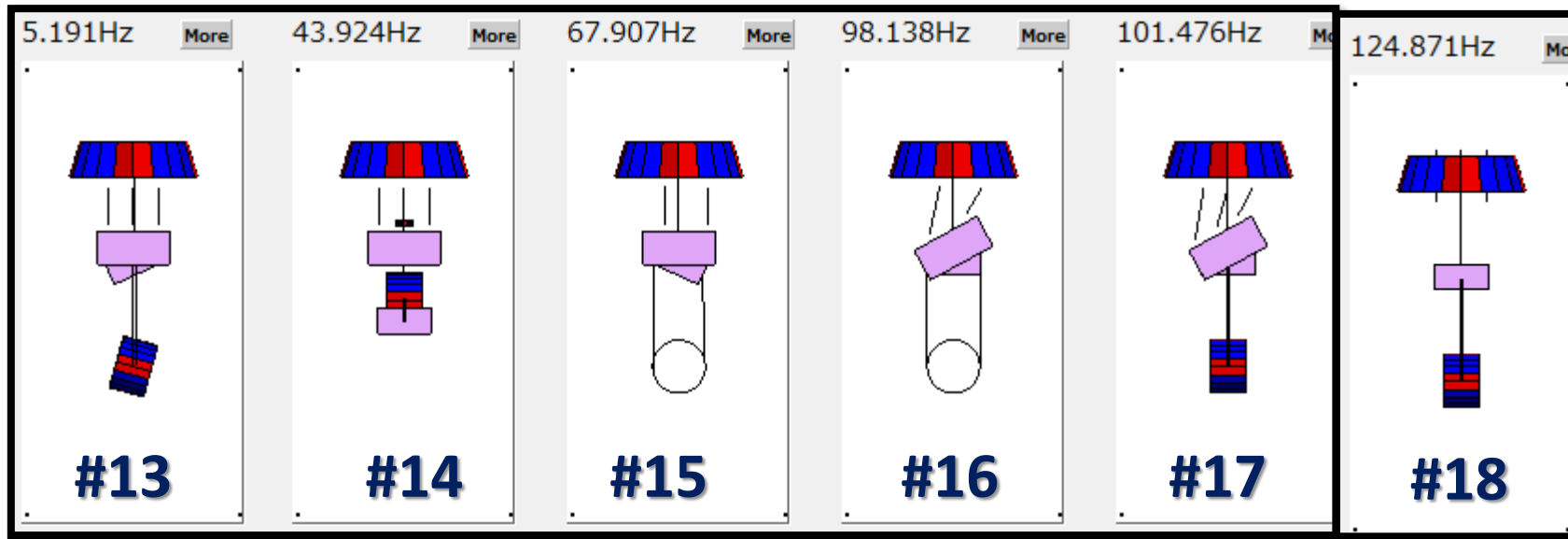
Eigen Mode Shape

TypeBpp for iKAGRA (real configuration)



Eigen Mode Shape

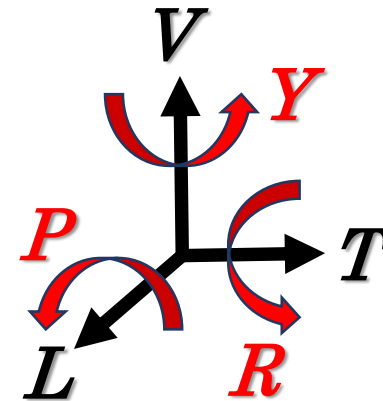
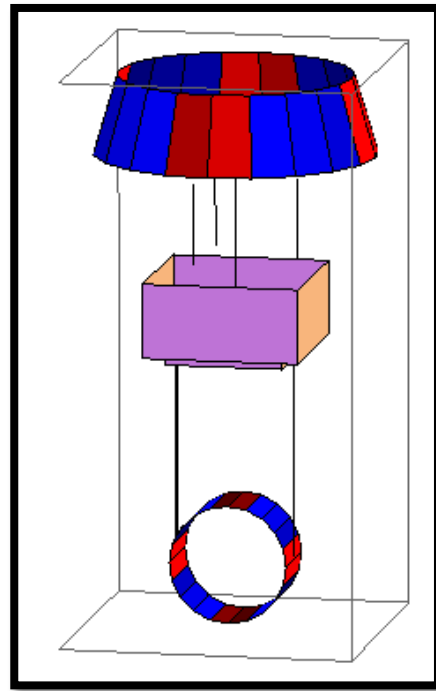
TypeBpp for iKAGRA (real configuration)



From 160301 measurement:

Force Transfer Functions with No Ctrl

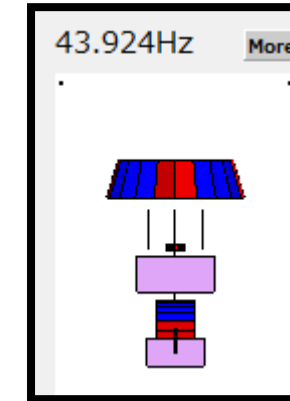
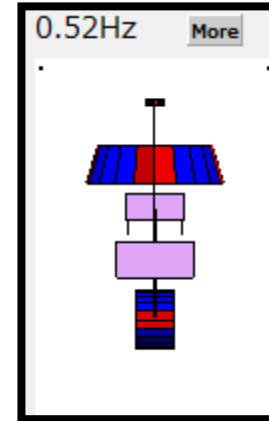
(, which can be measured and actuated.)



TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

#5 : GAS

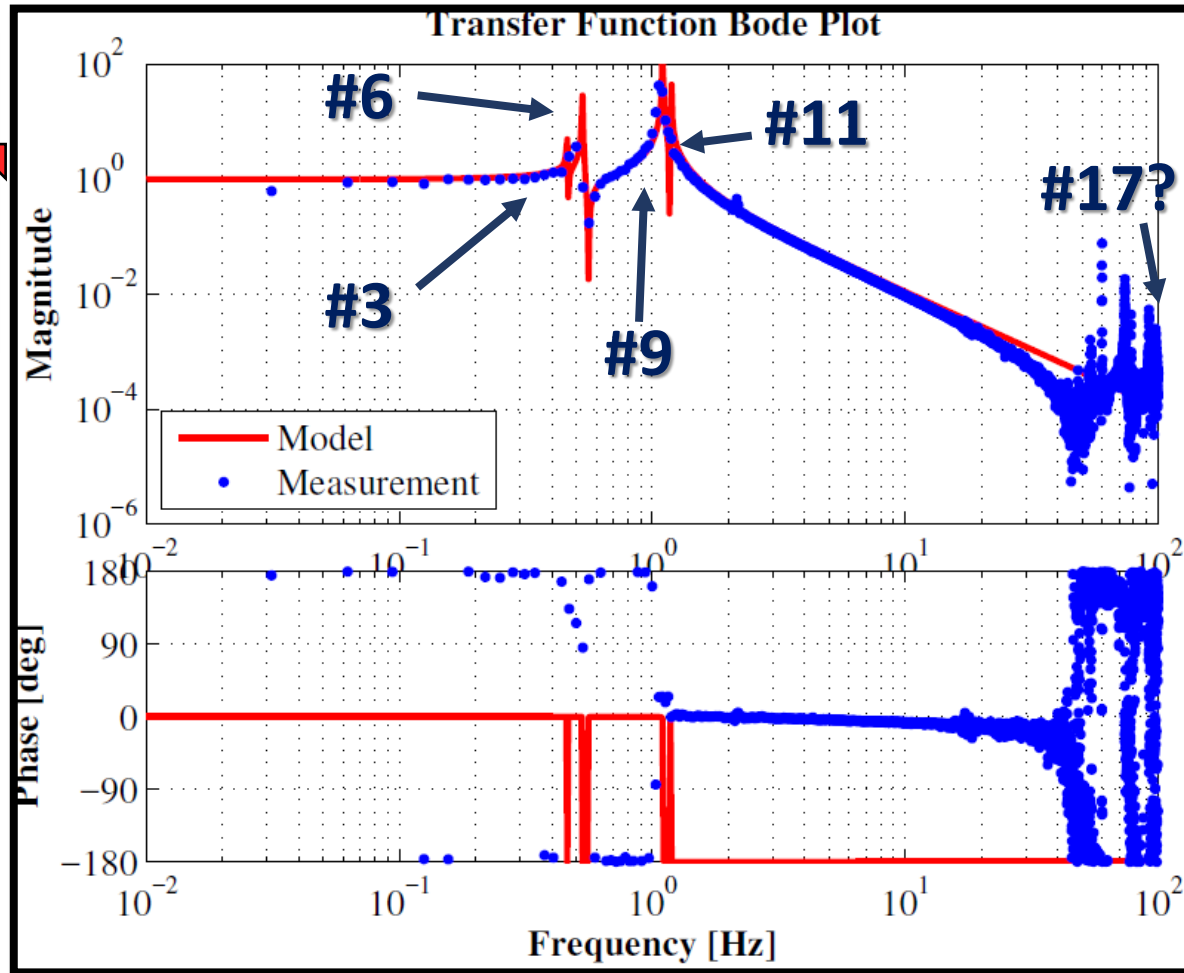
#14 : VRM



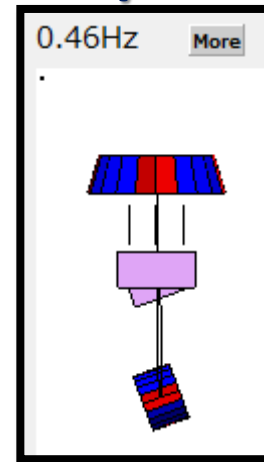
Force Transfer Function

TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

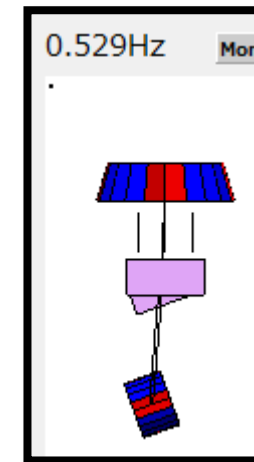
OSEM_LIM / actLIM



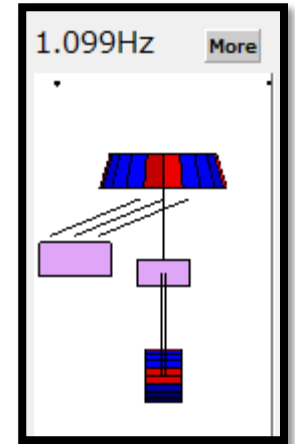
#3 : PIM
/PRM



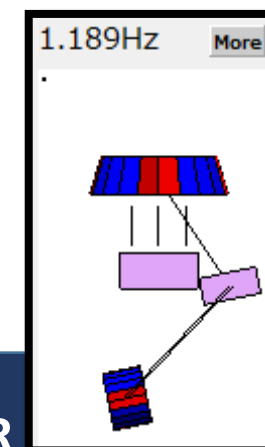
#6 : PIM
/PRM



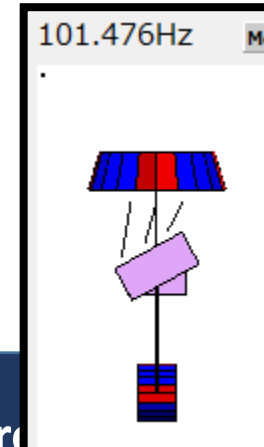
#9 : LIR



#11 : LIM



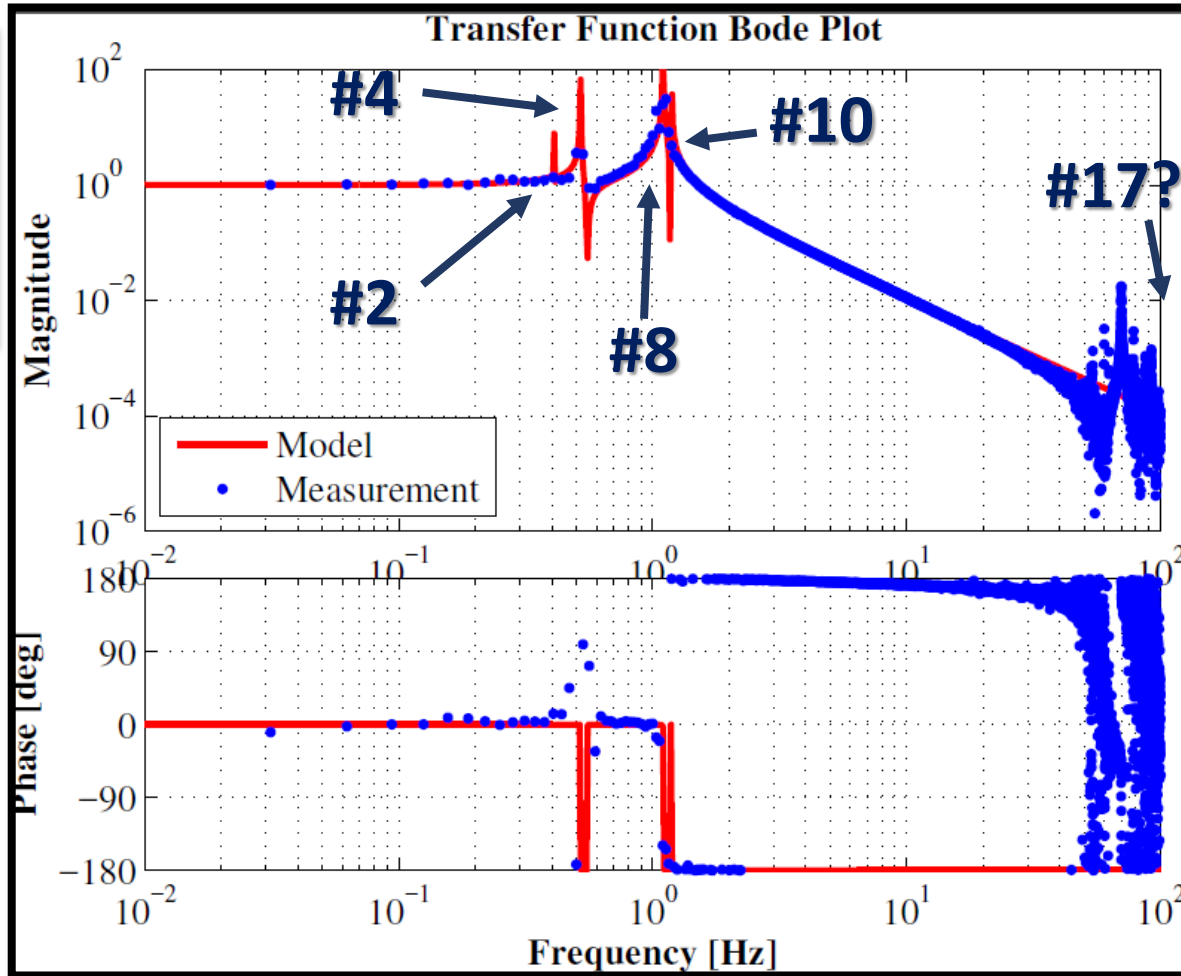
#17 : RIR ?



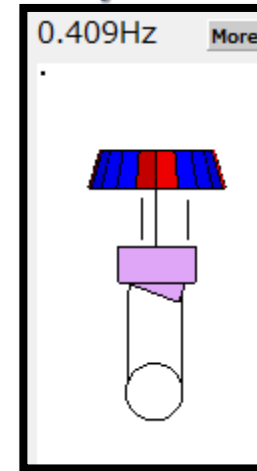
Force Transfer Function

TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

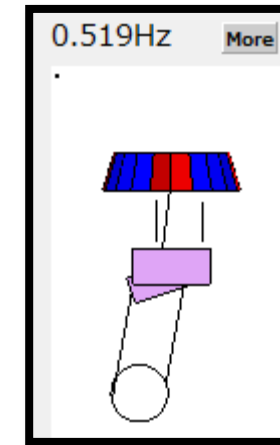
OSEM_TIM / actTIM



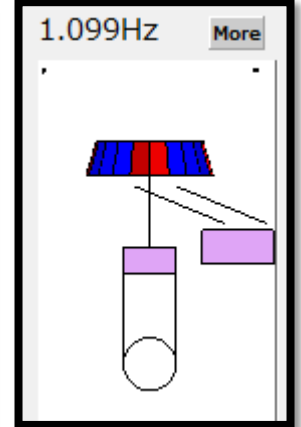
#2 : RIM
/RRM



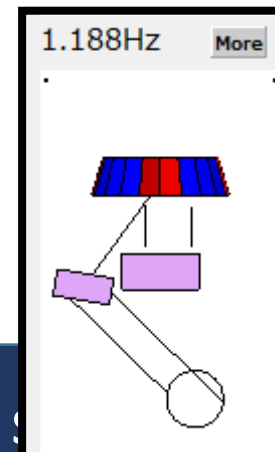
#4 : RIM
/RRM



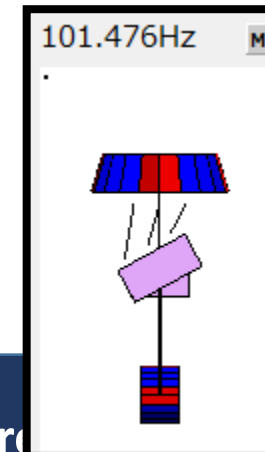
#8 : TIR



#10 : TIM



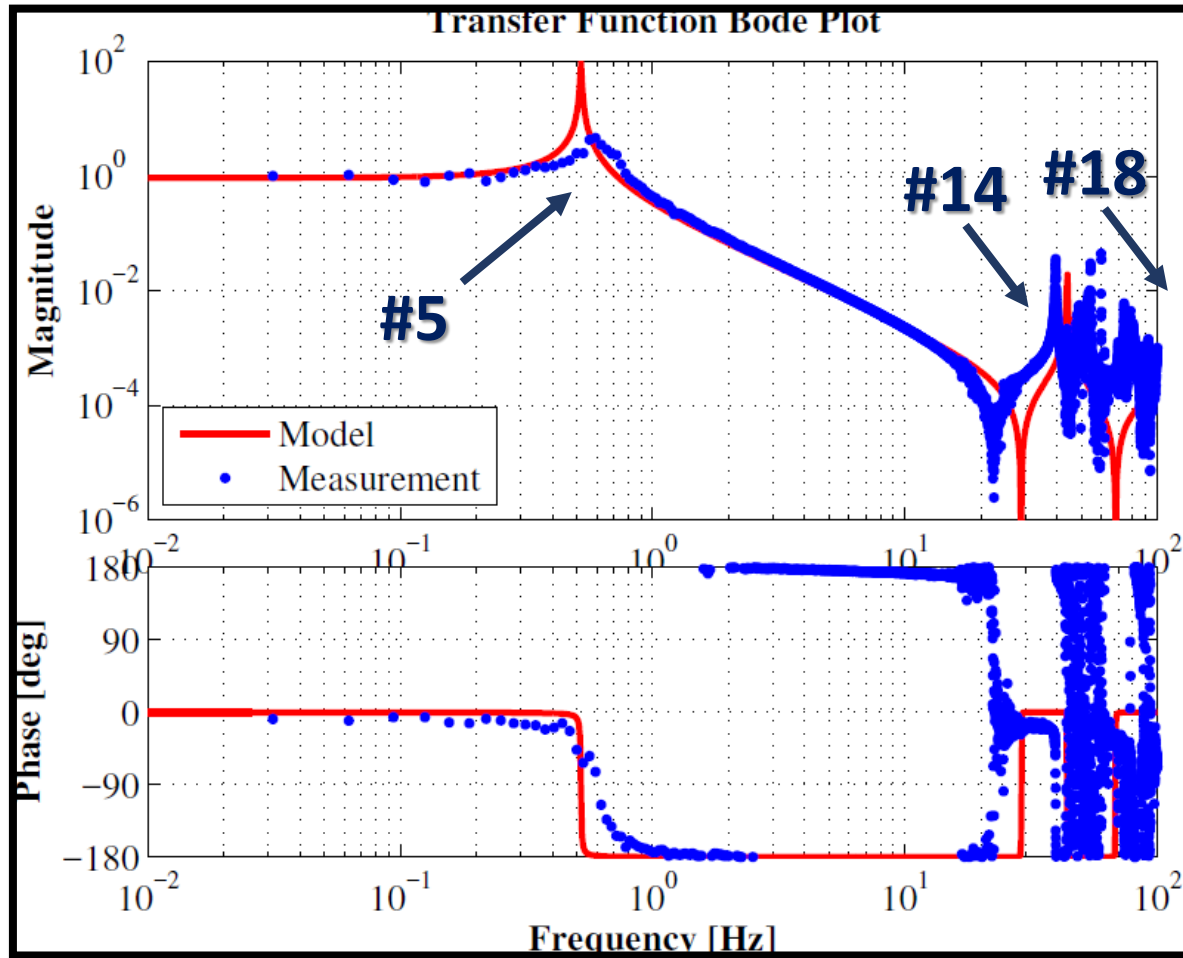
#17 : RIR ?



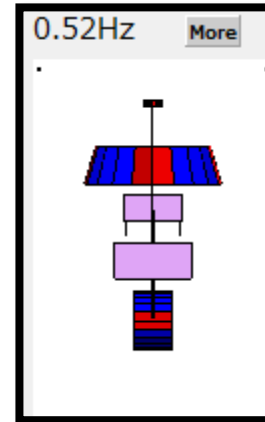
Force Transfer Function

TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

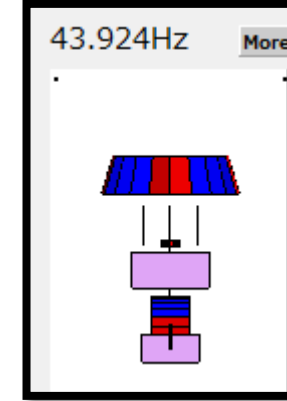
OSEM_VIM / actVIM



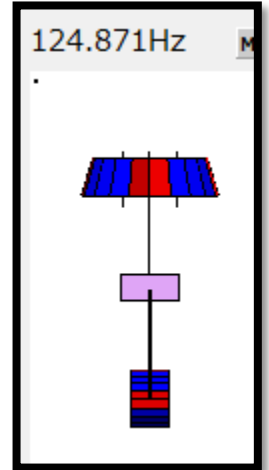
#5 : GAS



#14 : VRM

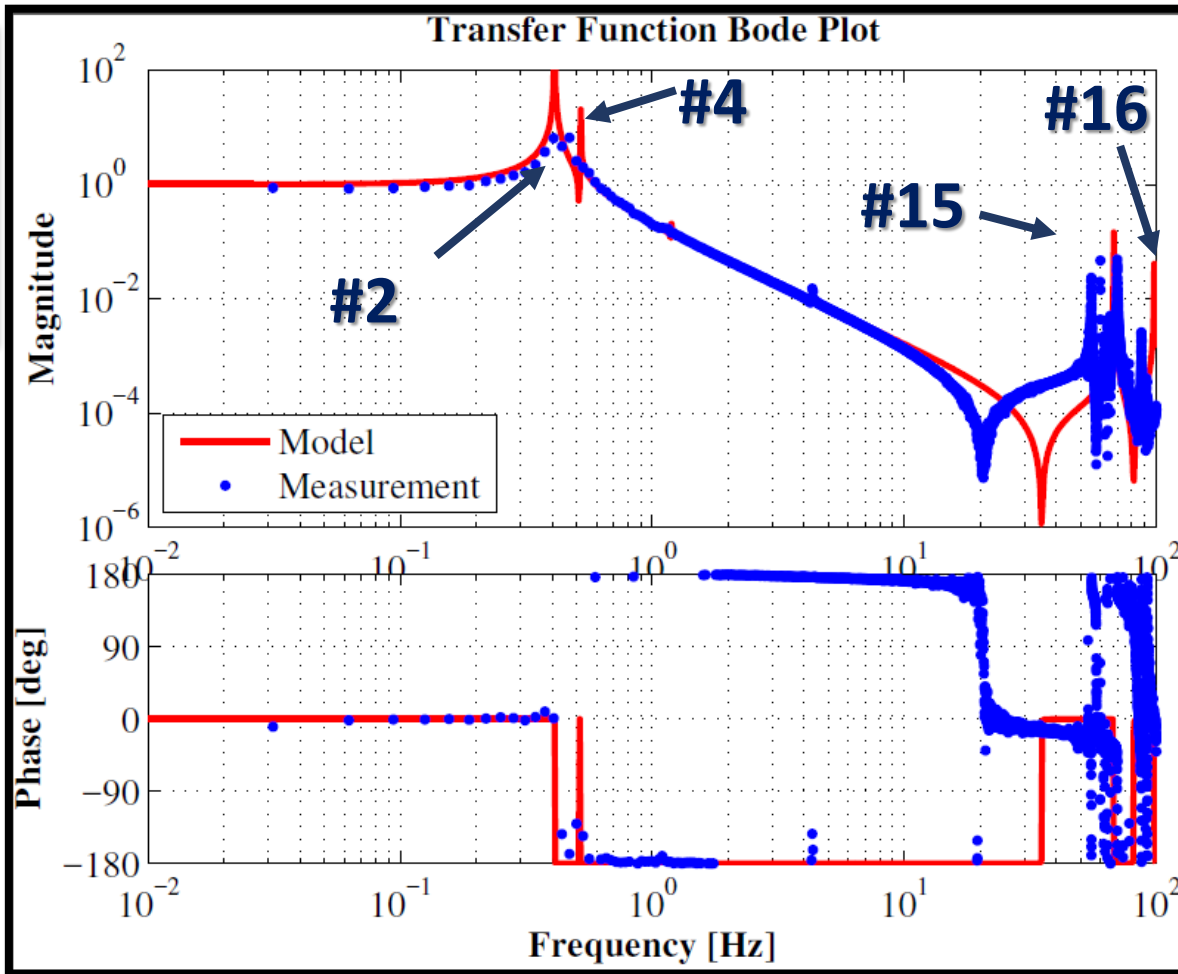


#18 : VIR

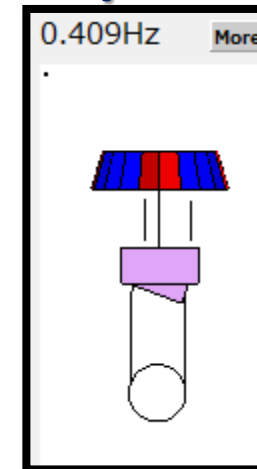


Force Transfer Function TypeBp with IP

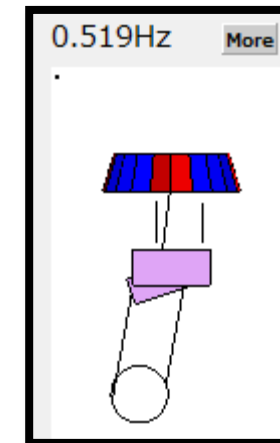
OSEM_RIM / actRIM



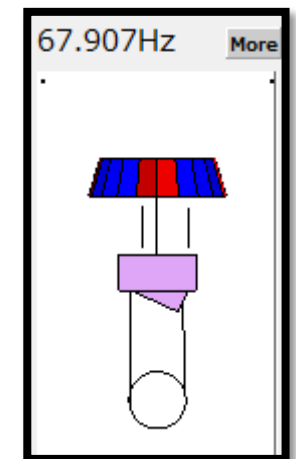
**#2 : RIM
/RRM**



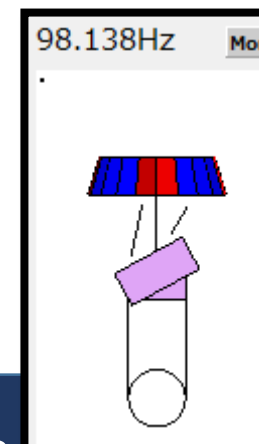
**#4 : RIM
/RRM**



#15 : RIM



#16 : RIR



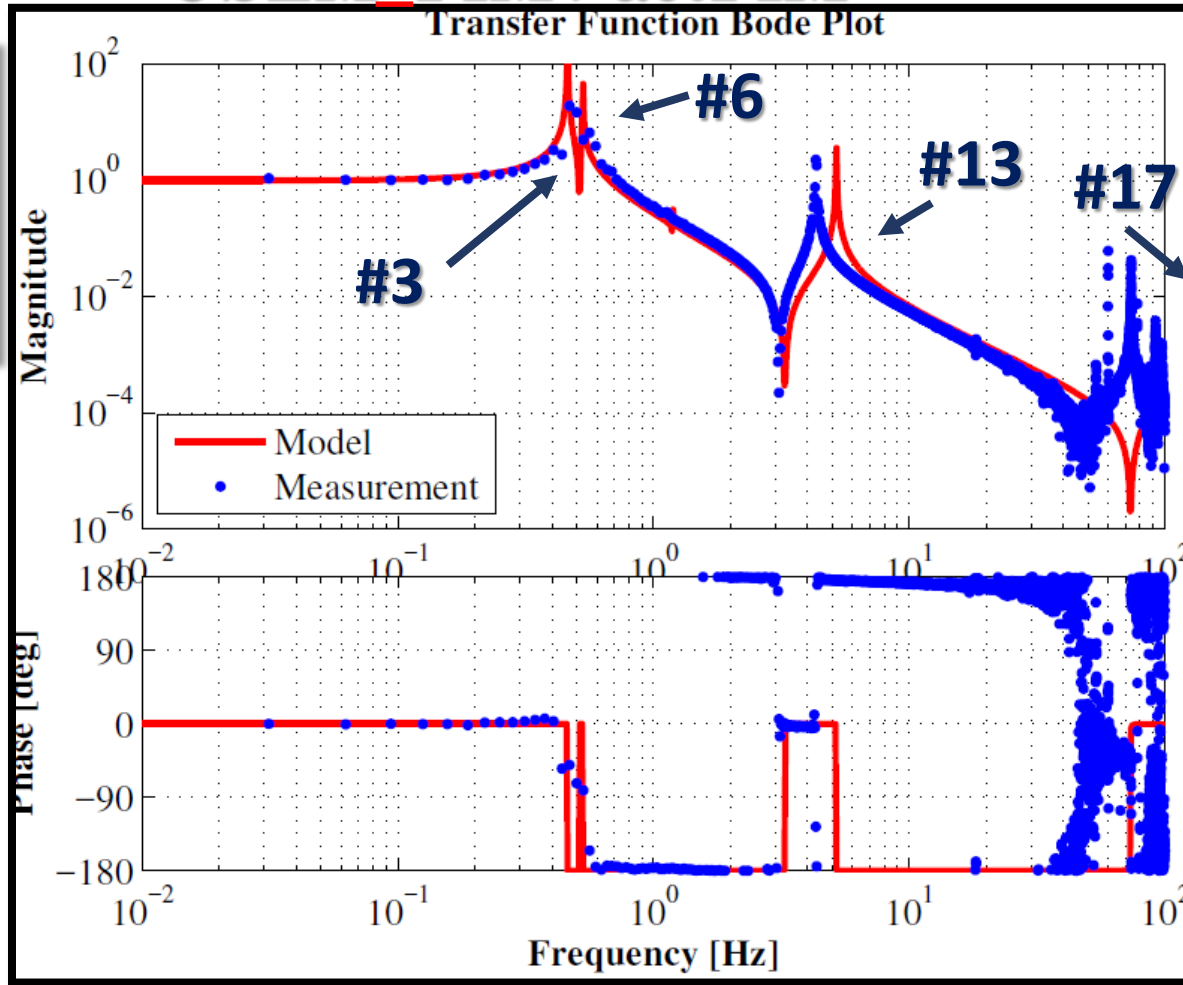
PR SAS model for real iKAGRA PR3

Force Transfer Function

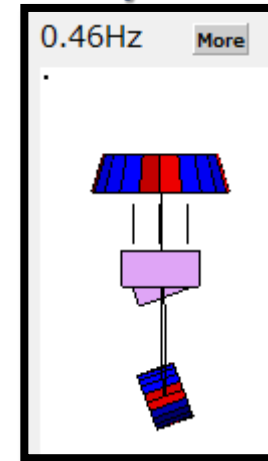
TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

OSEM_PIM / actPIM

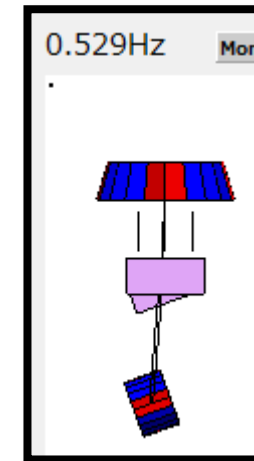
Transfer Function Bode Plot



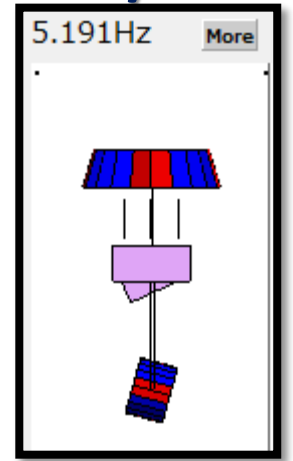
#3 : PIM
/PRM



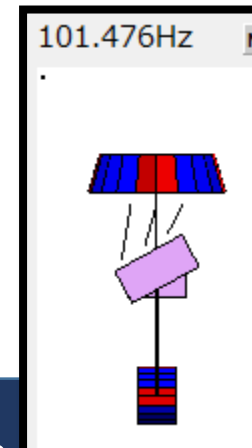
#6 : PIM
/PRM



#13 : PIM
/PRM



#17 : PIR



PR SAS Model for real iKAGRA PR3

Force Transfer Function

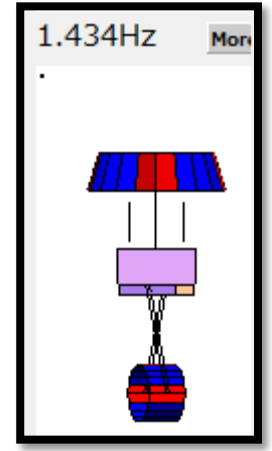
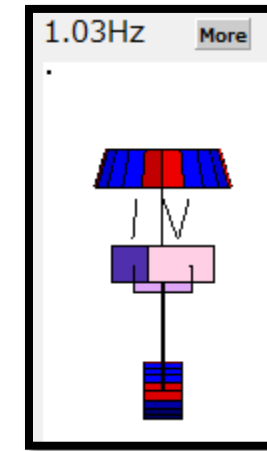
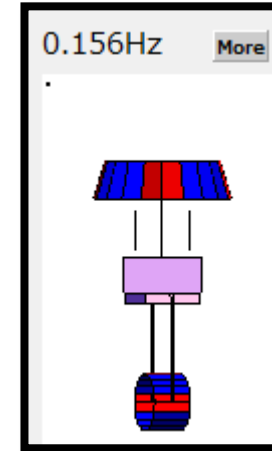
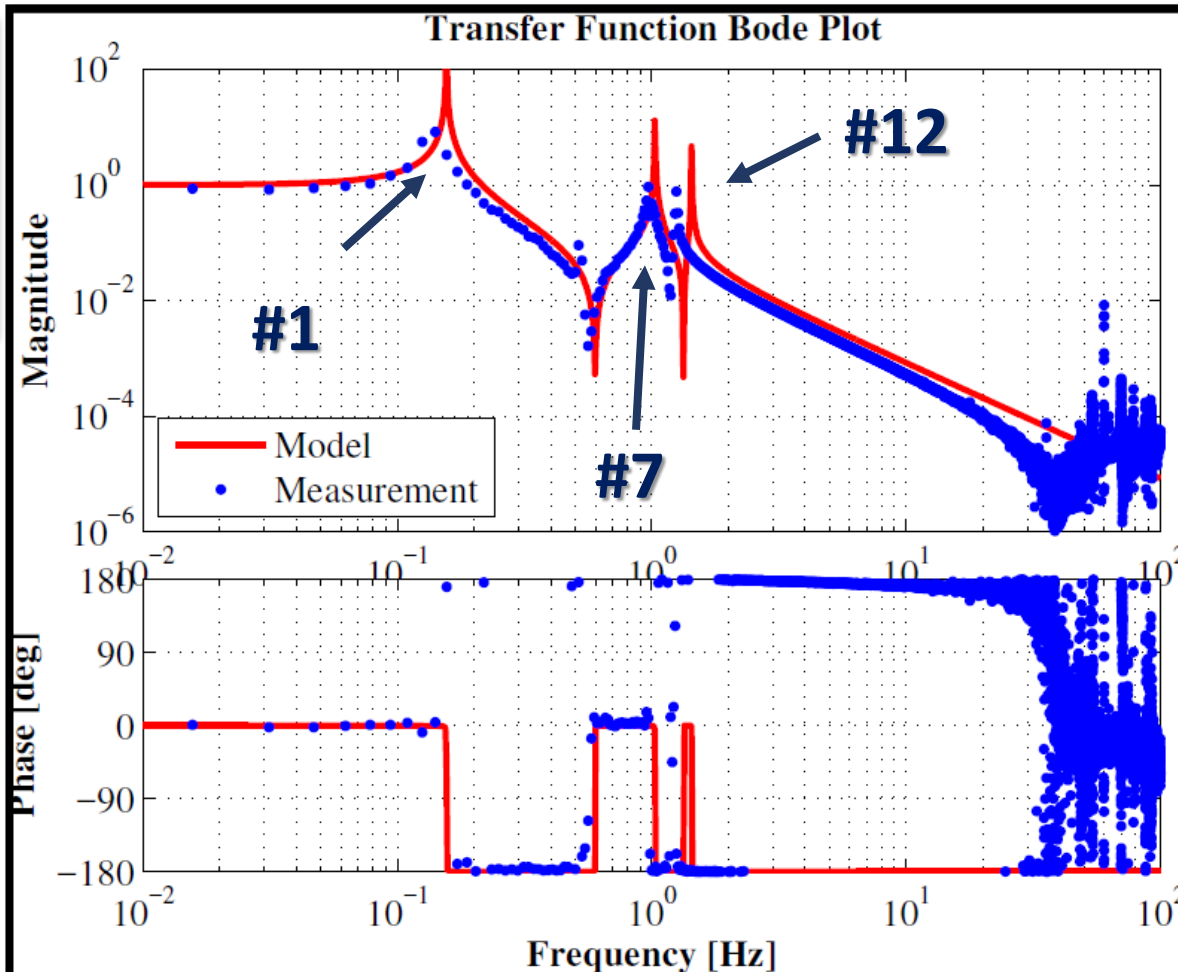
TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

OSEM_YIM / actYIM

#1 : Whole
chain

#7 : YIR

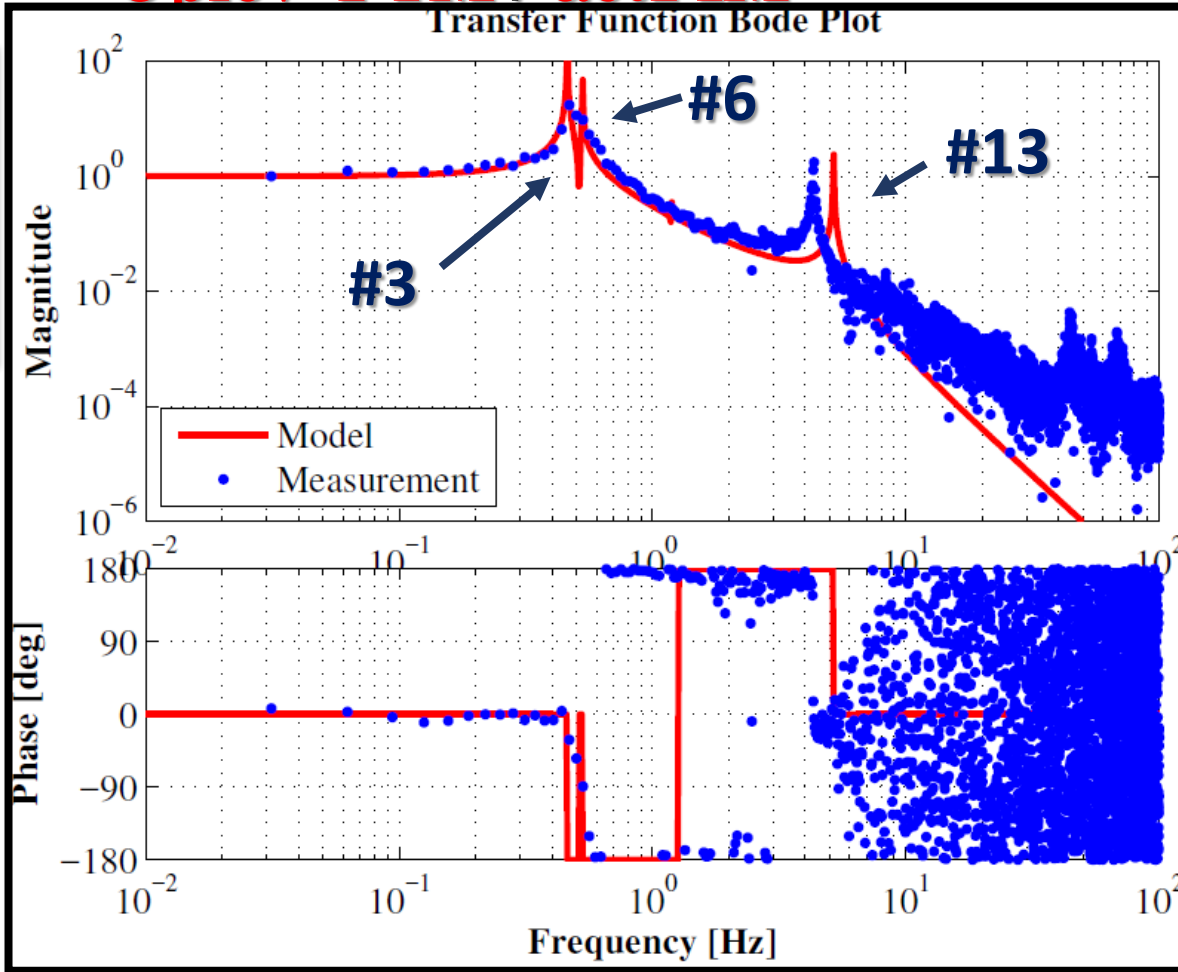
#12 : YIM
/YIR



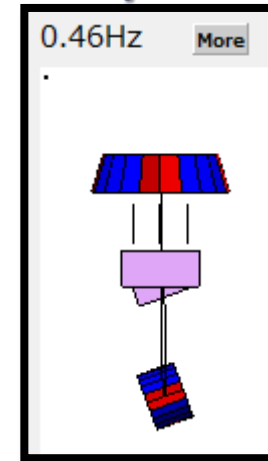
Force Transfer Function

TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

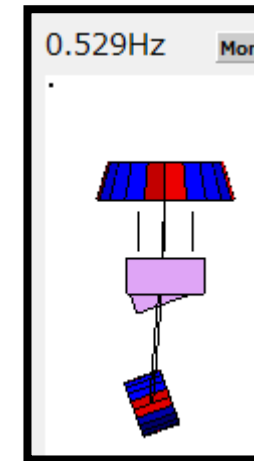
Oplev PTM / actPIM



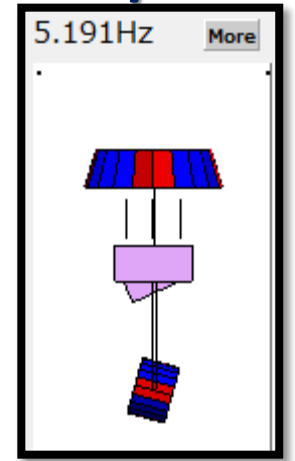
#3 : PIM
/PRM



#6 : PIM
/PRM



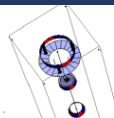
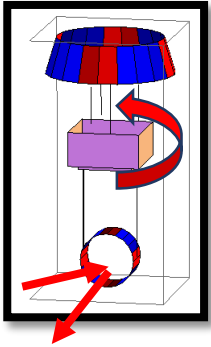
#13 : PIM
/PRM



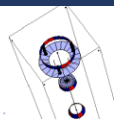
Force Transfer Function

TypeBpp for iKAGRA (real configuration)

OpLev_YTM / actYIM

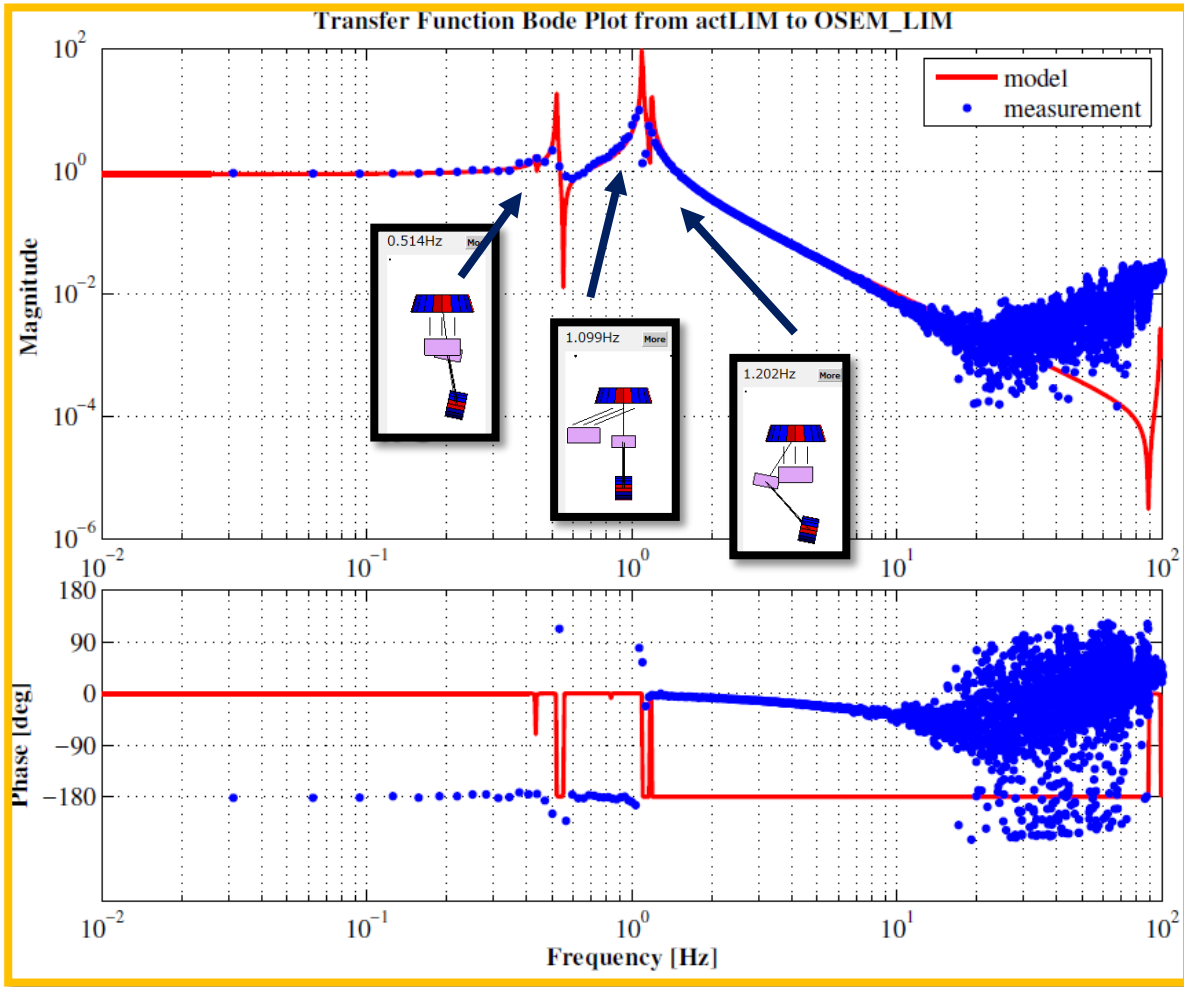


③ Installation test vs. SUMCON : TypeBpp_iKAGRA

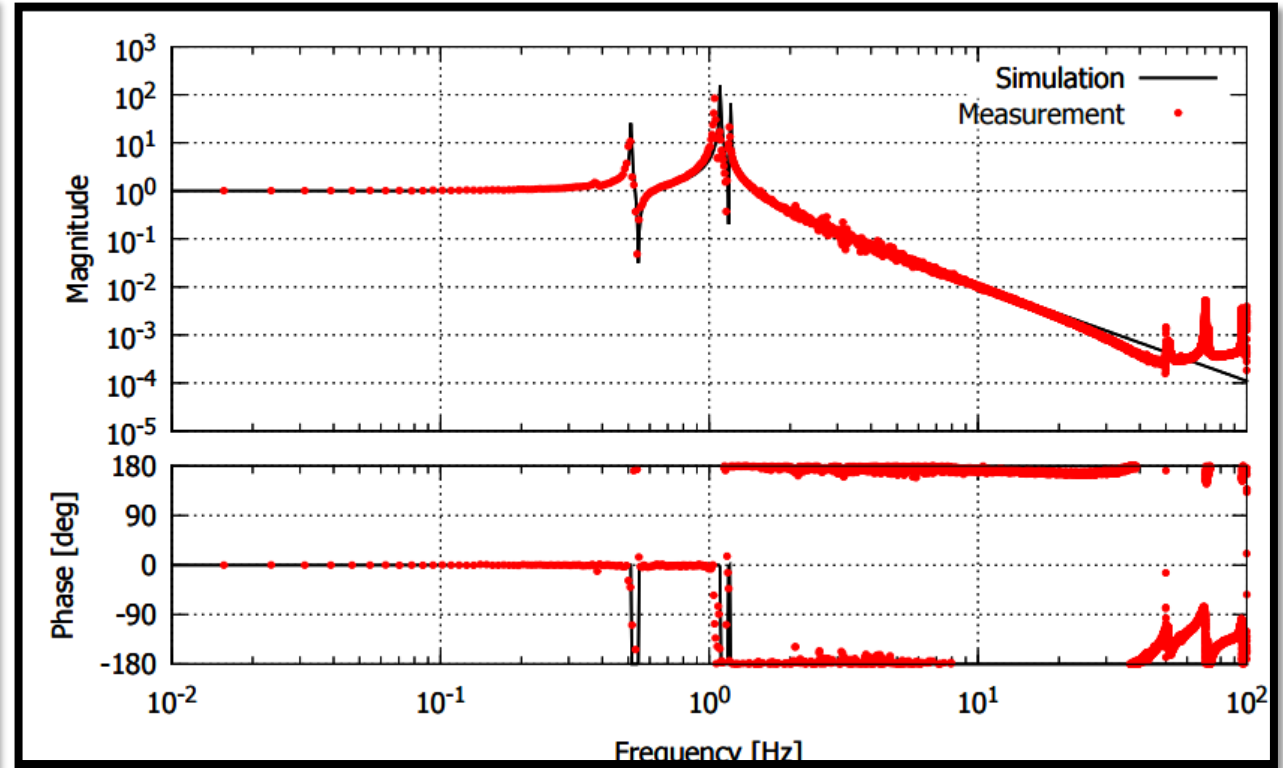


❖ Investigation of TypeBpp Frequency response

LIM (OSEM) TF

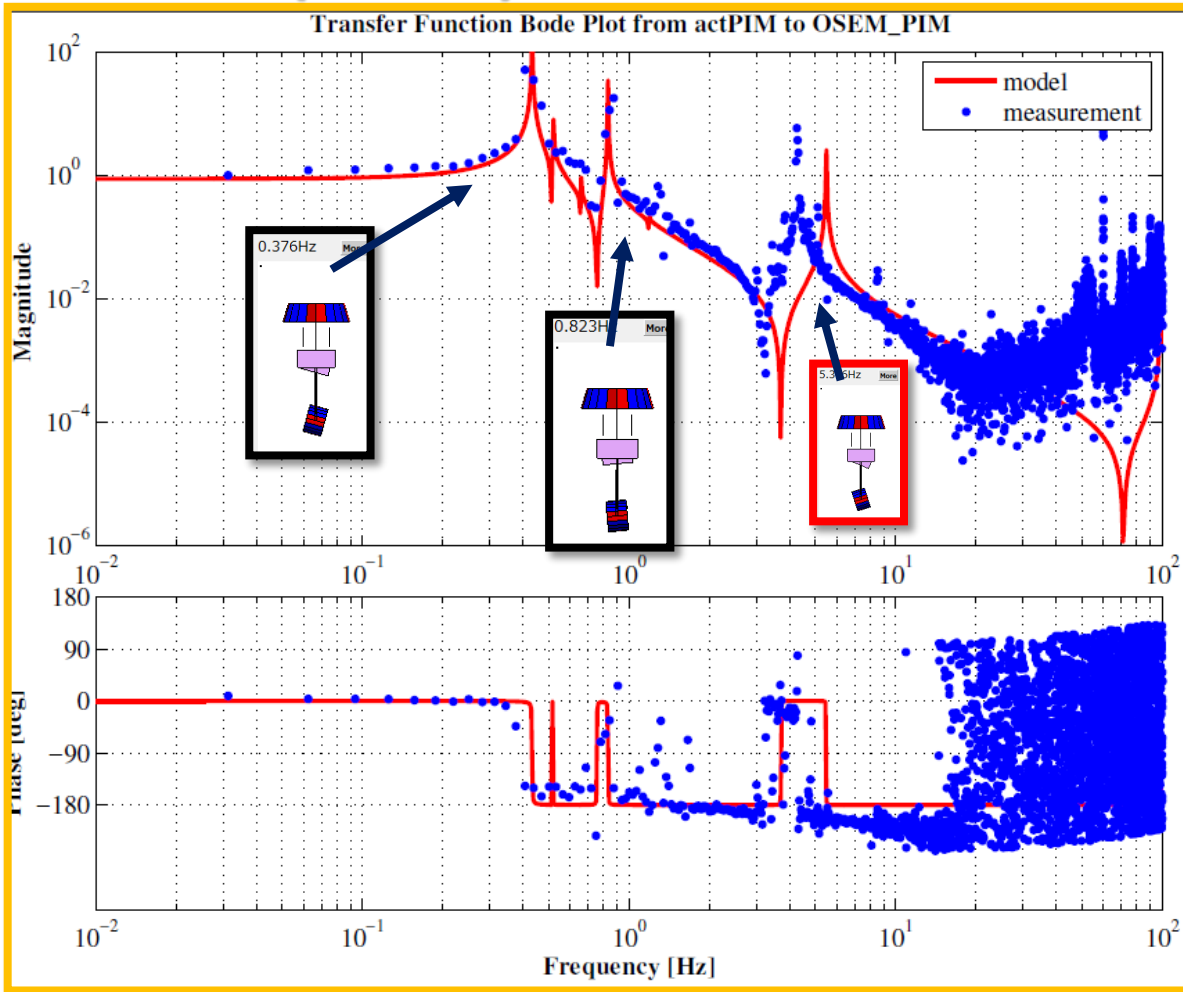


REF : LIM (OSEM) TF of 20 m SAS

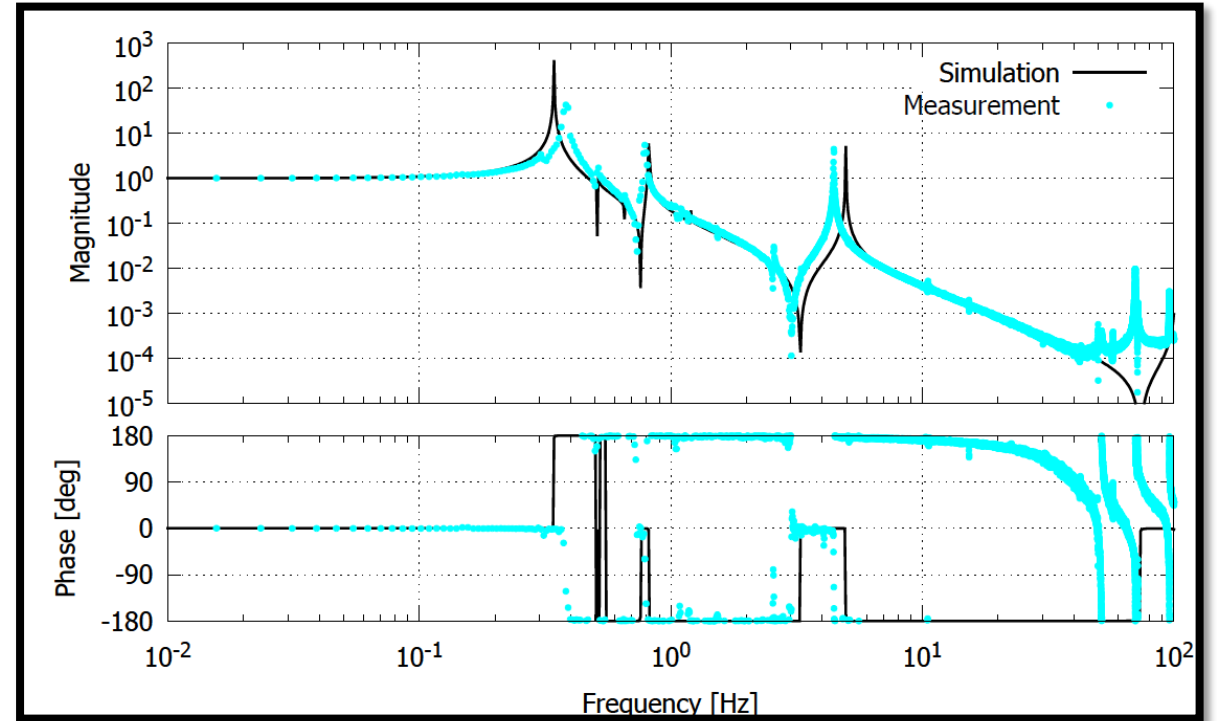


Investigation of TypeBpp Frequency response

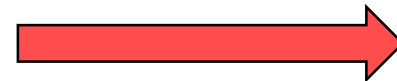
PIM (OSEM) TF



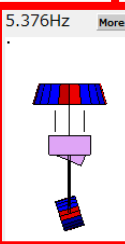
REF : PIM (OSEM) TF of 20 m SAS



Resonance frequency is lower than its prediction by around 1 Hz.

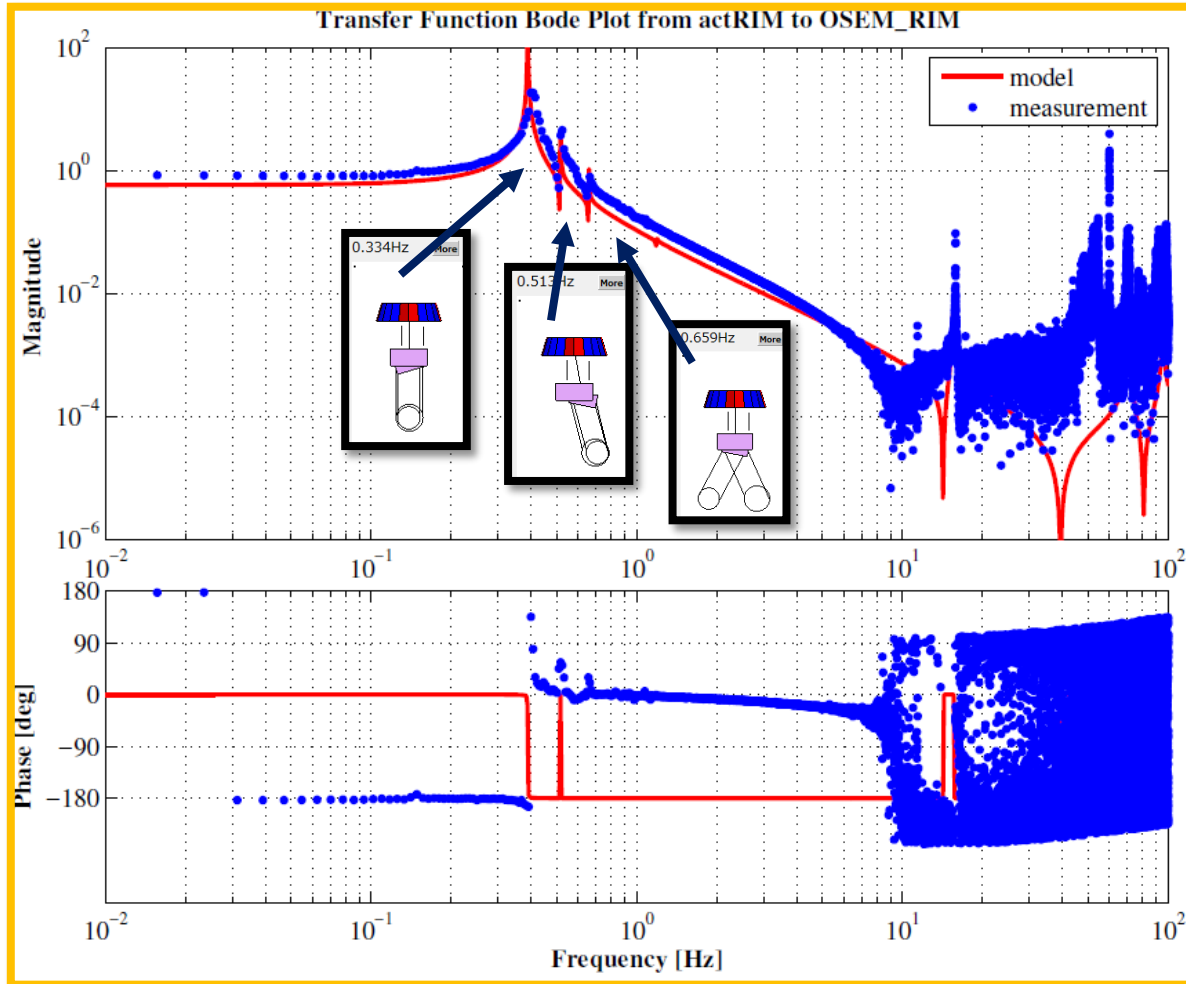


To be investigated.

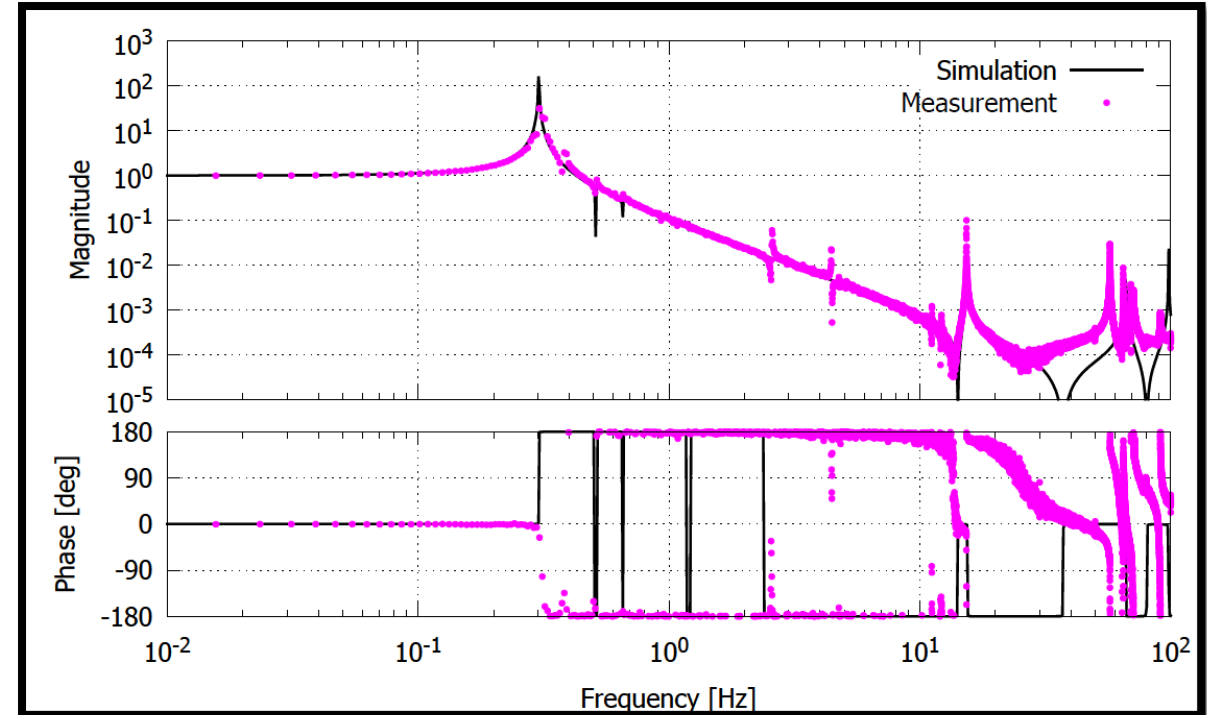


Investigation of TypeBpp Frequency response

RIM (OSEM) TF



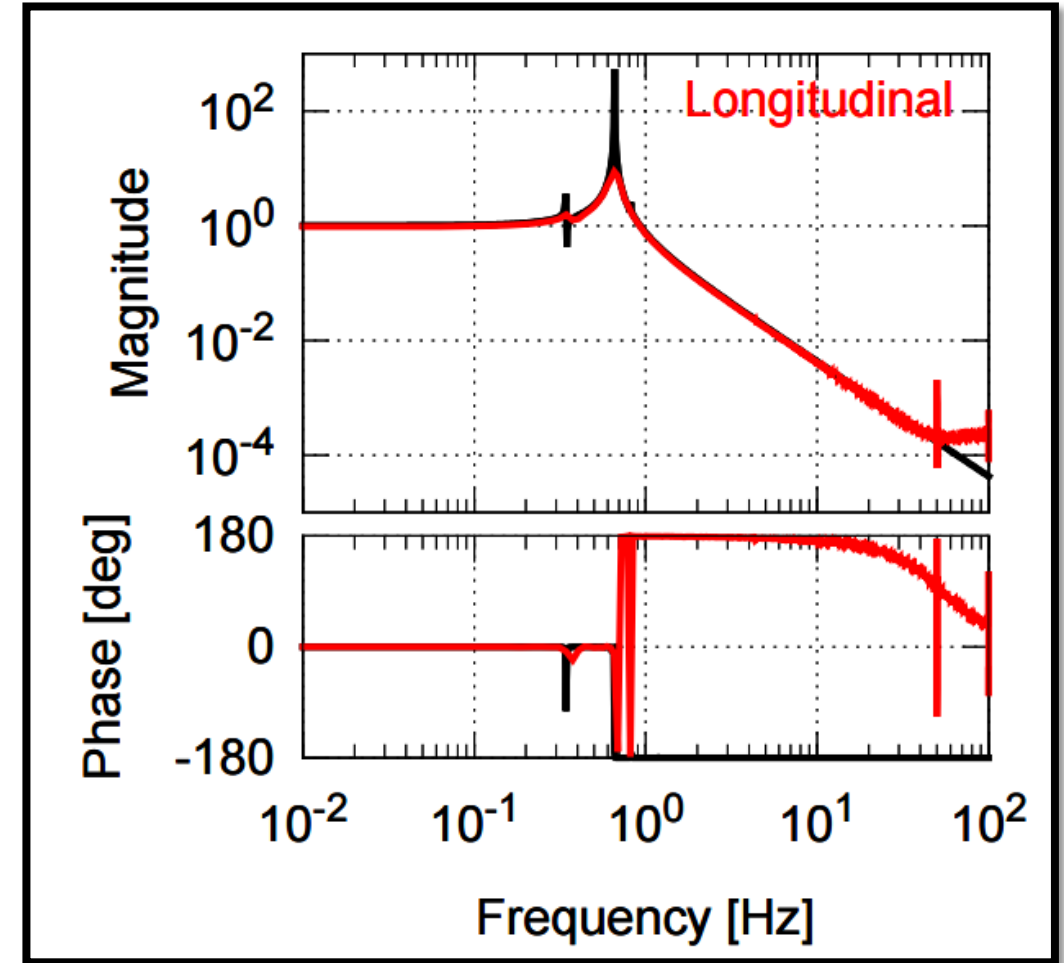
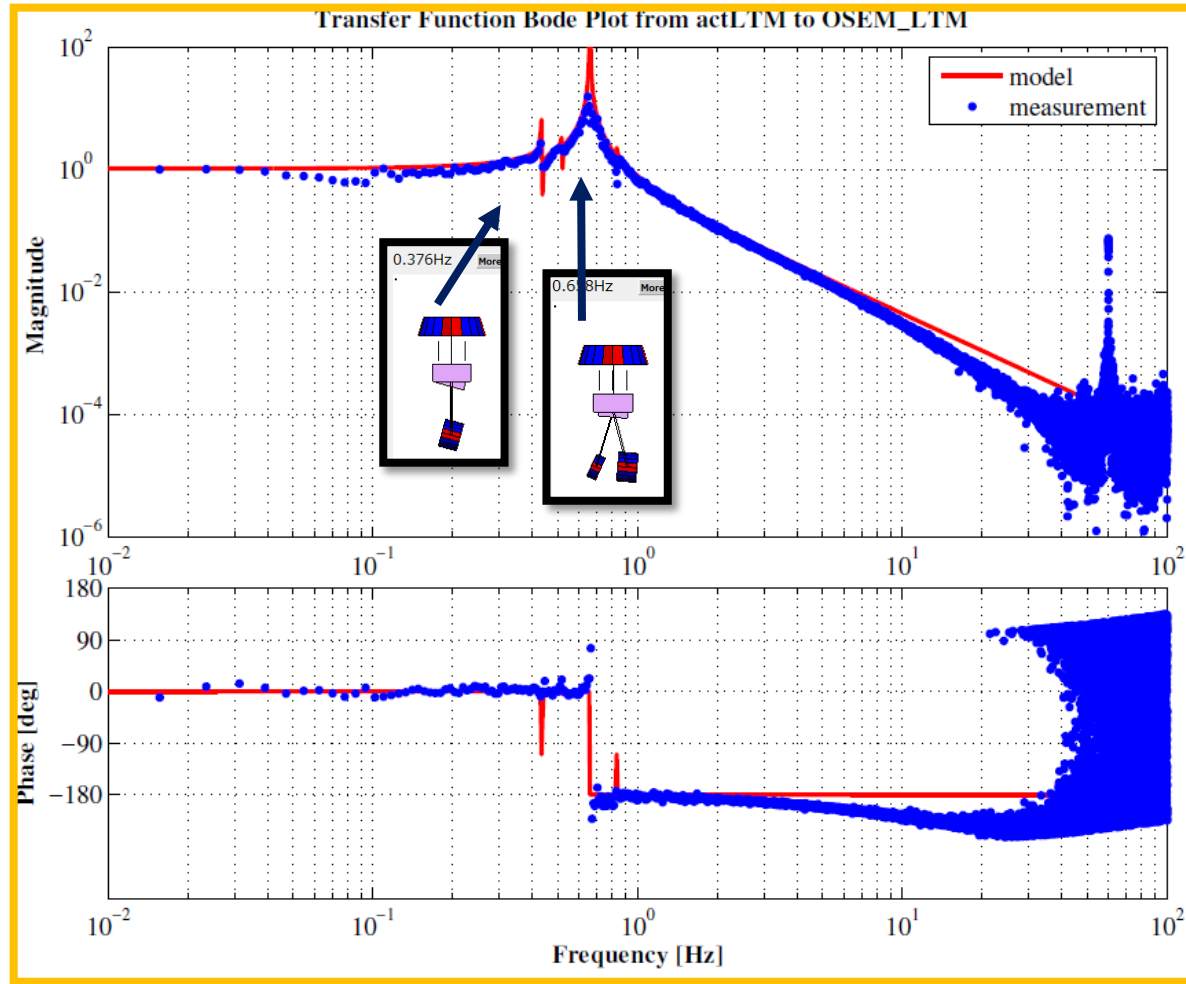
REF : RIM (OSEM) TF of 20 m SAS



❖ Investigation of TypeBpp Frequency response

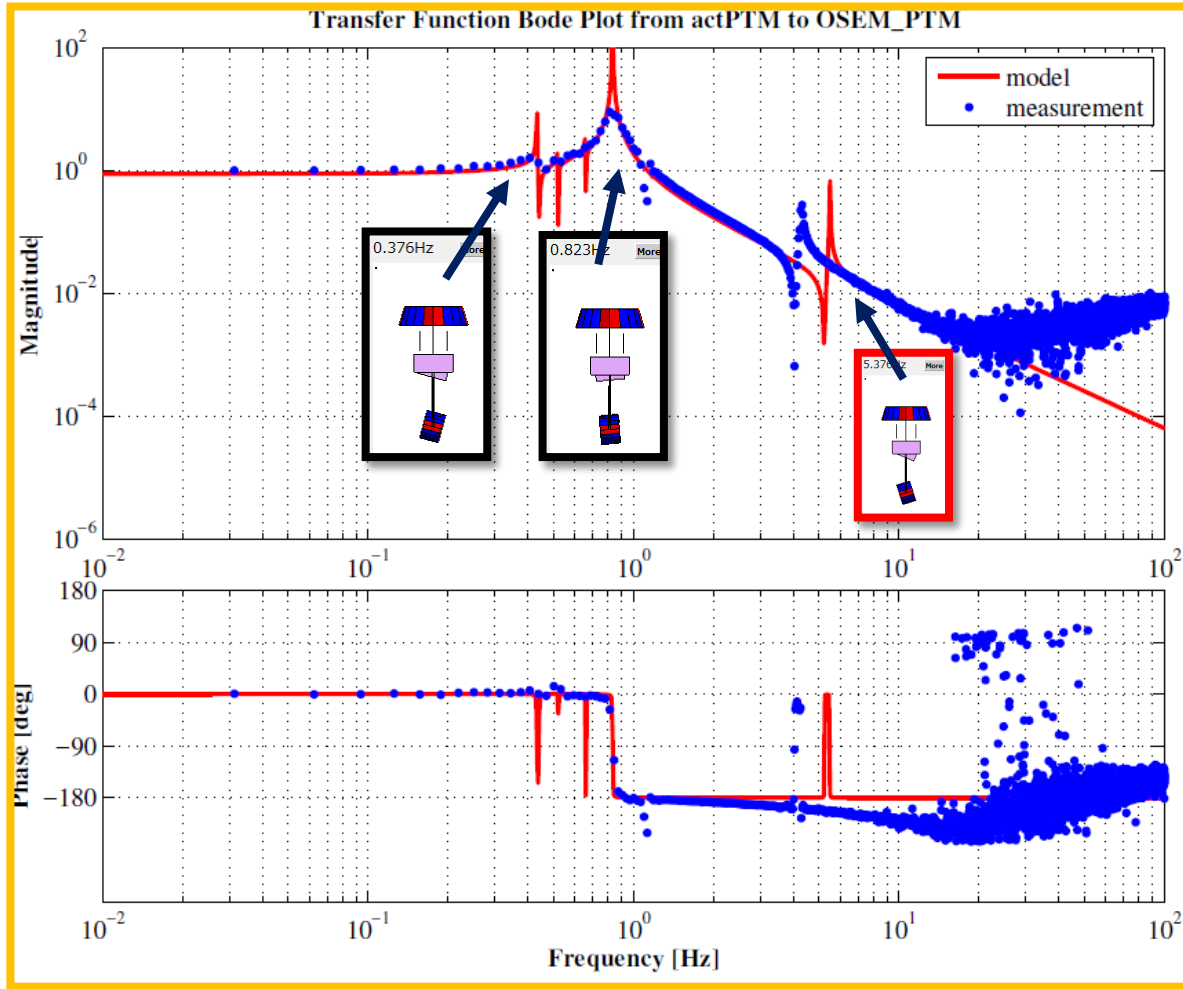
LTM (OSEM) TF

REF : LTM (OSEM) TF of 20 m SAS

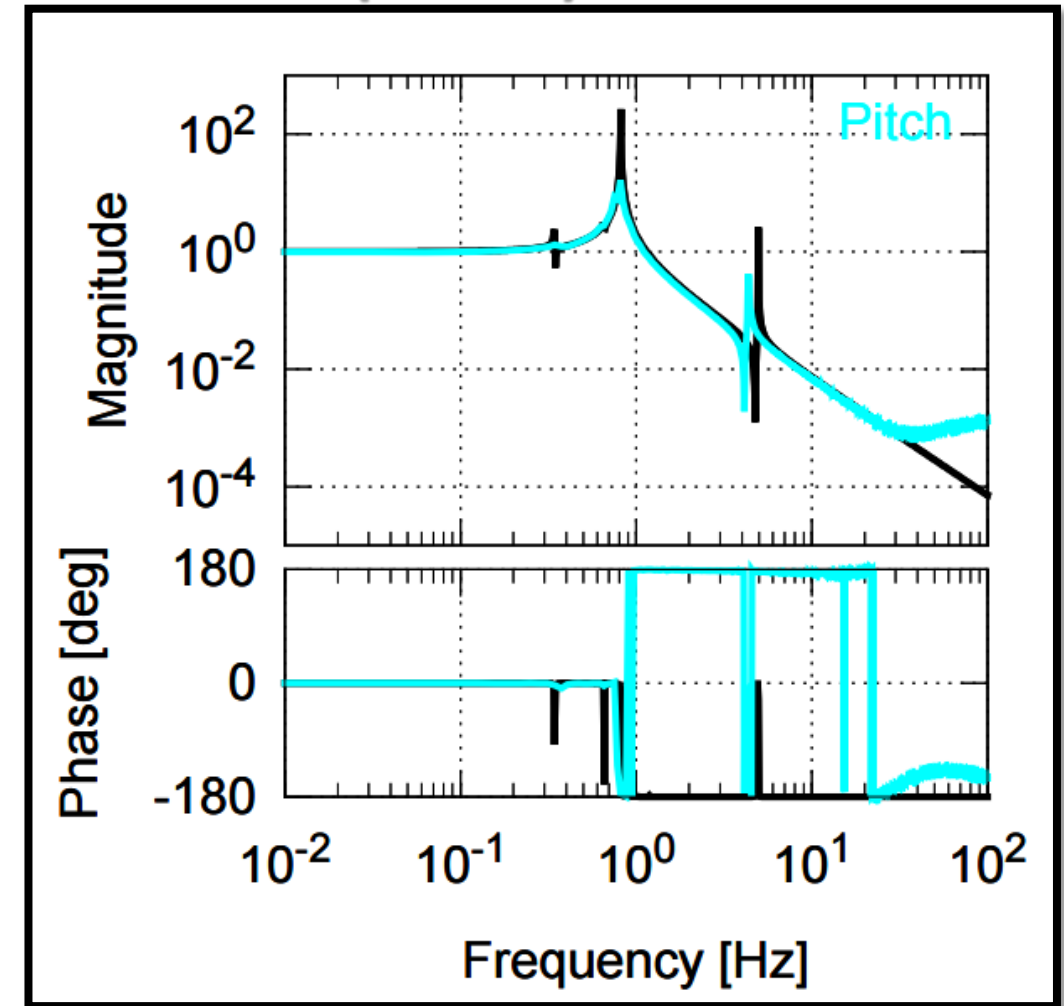


Investigation of TypeBpp Frequency response

PTM (OSEM) TF



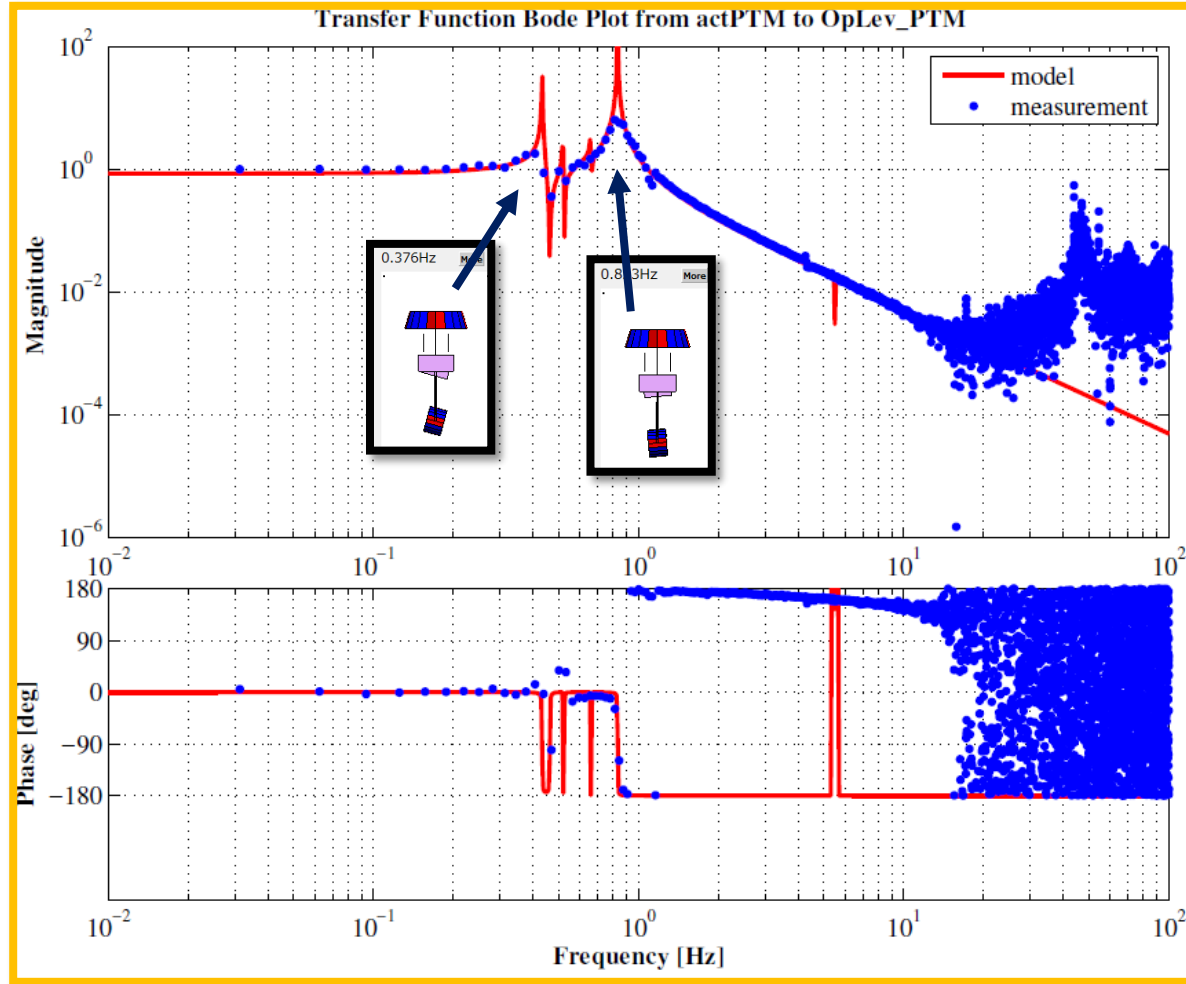
REF : PTM (OSEM) TF in 20 m SAS



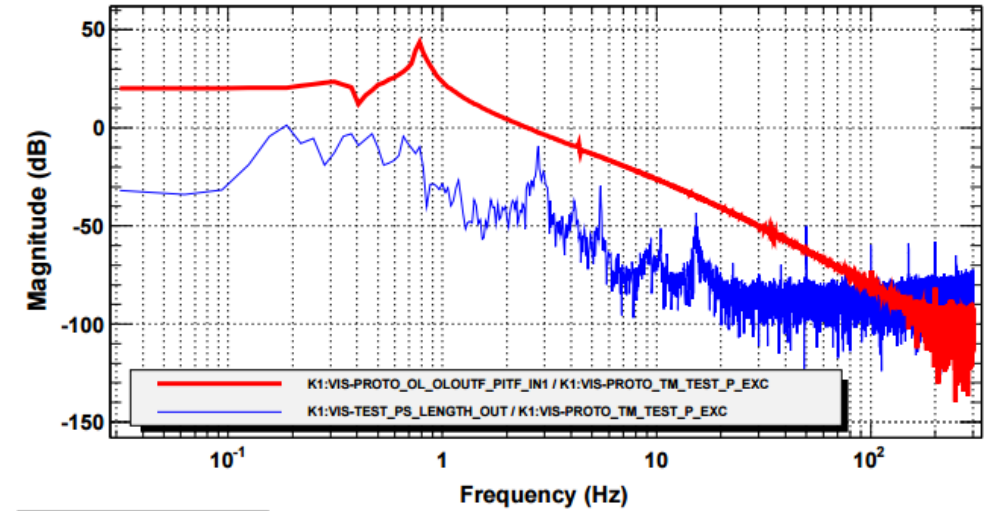
Investigation of TypeBpp Frequency response

PTM (Oplev) TF

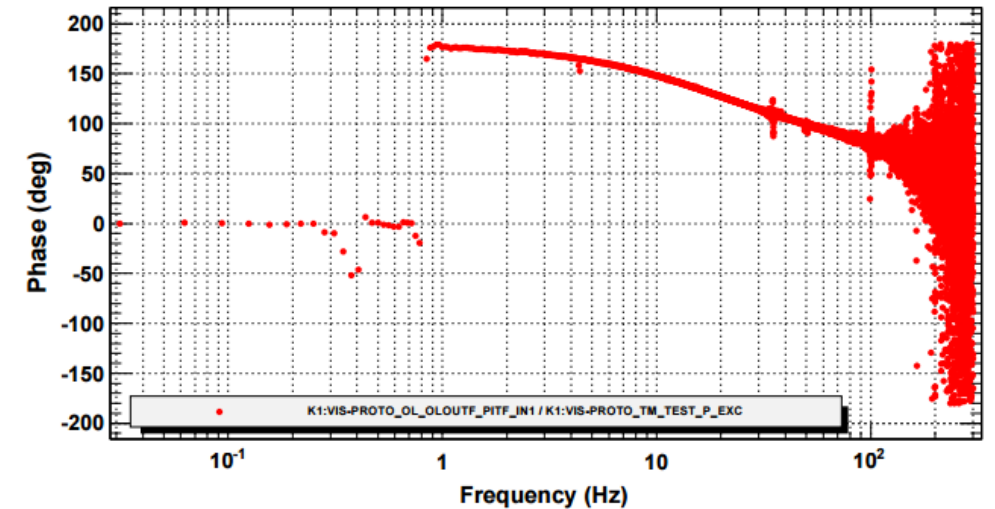
REF : PTM (Oplev) TF of Type B1



Transfer function

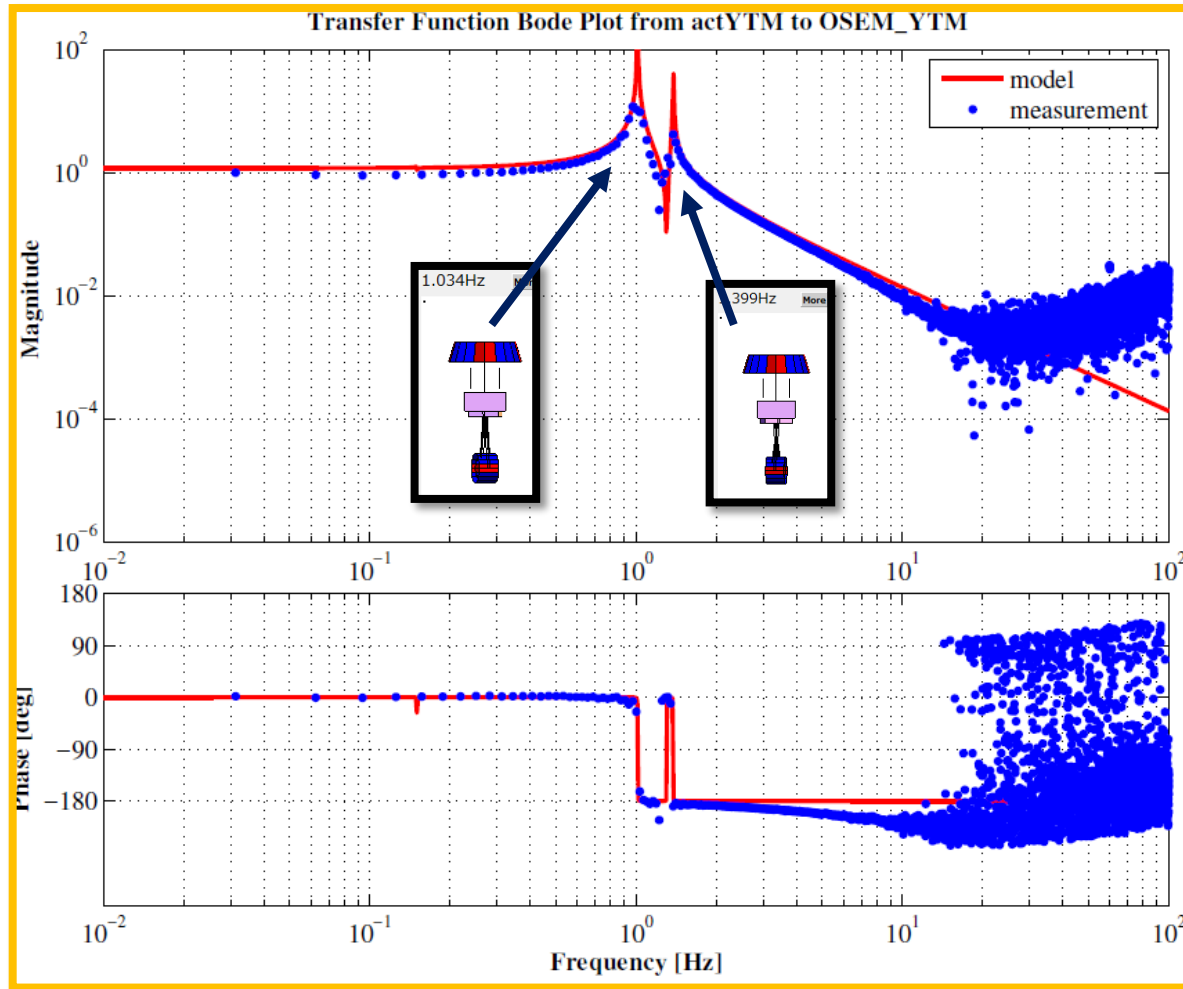


Transfer function

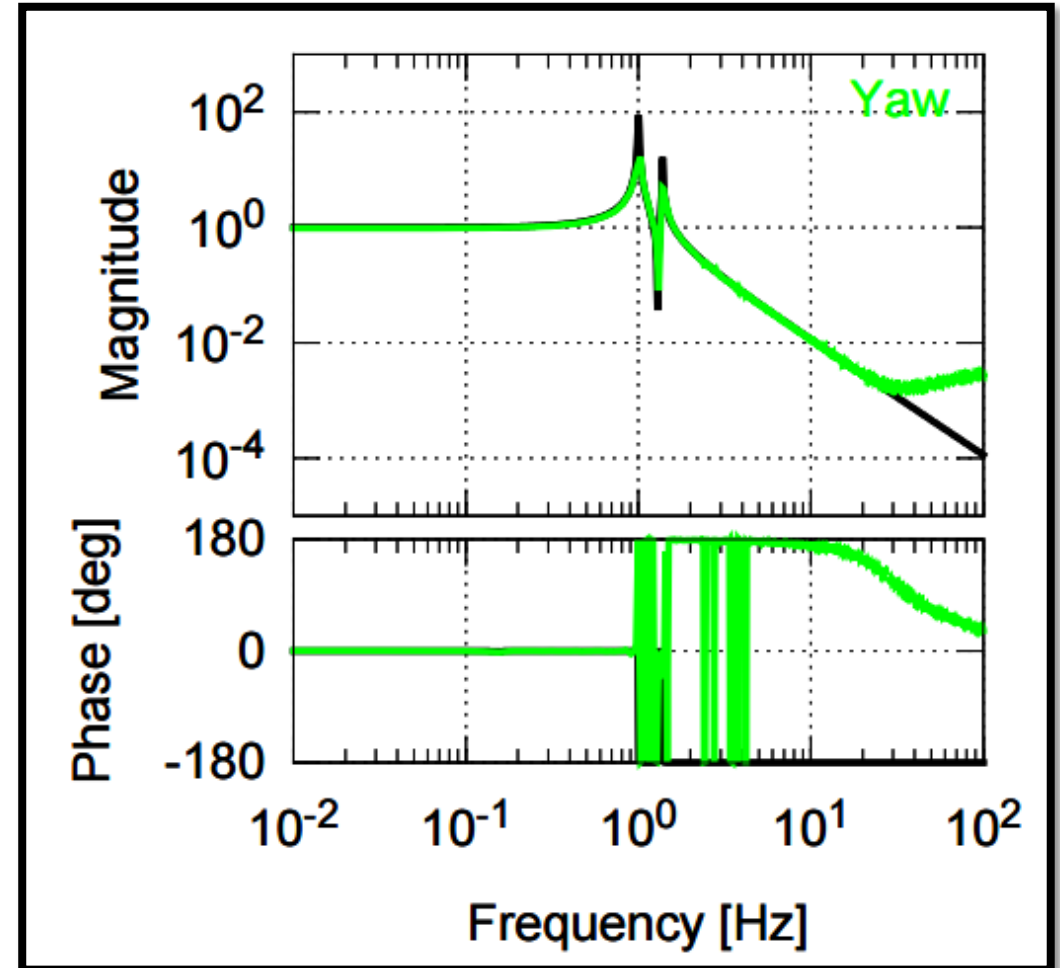


❖ Investigation of TypeBpp Frequency response

YTM (OSEM) TF

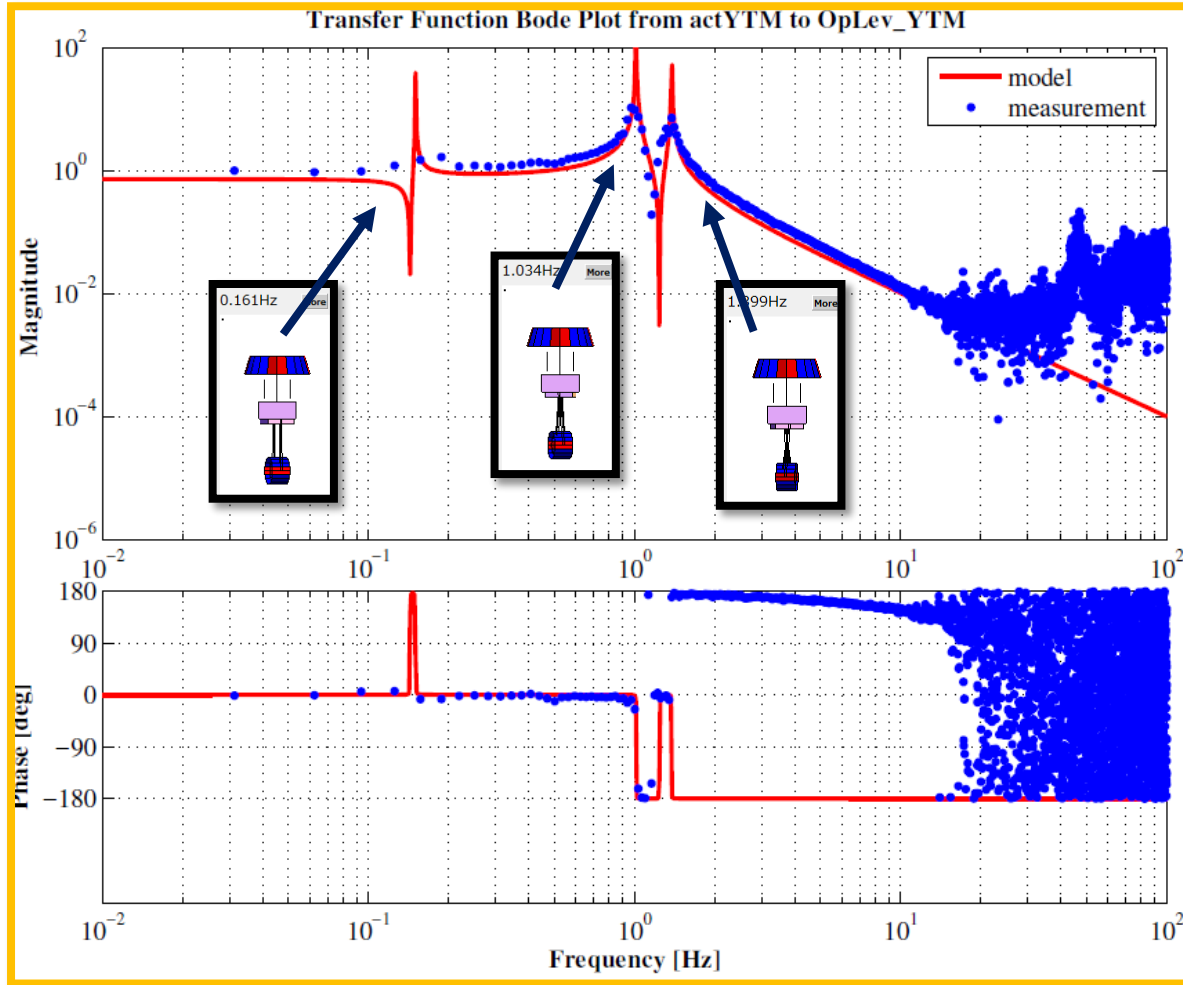


REF : LTM (OSEM) TF of 20 m SAS



Investigation of TypeBpp Frequency response

YTM (Oplev) TF



REF : YTM (Oplev) TF of Type B1

