

# KAGRAでは光てこをどうするか

道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

坪野研究室 博士課程1年

# 本スライドの目的

- 光てこ(OpLev)をデザインするにあたっての要求値を計算  
定量的な議論
- OpLevに関しての道村の認識が正しいか確認  
**赤字斜体**の部分は特に確認したいところ
- 話したい点
  - OpLevの役割はなにか  
特にドリフトモニタとしてどこまで期待するか
  - OpLevのデザインをどうするか  
どこから入れて、どこから出すか  
折り返しのあり/なし、2つQPDを使う？
  - どこに必要か  
主干涉計の全部の鏡？ MCは？  
optical benchには？

# OpLevの役割

まずは

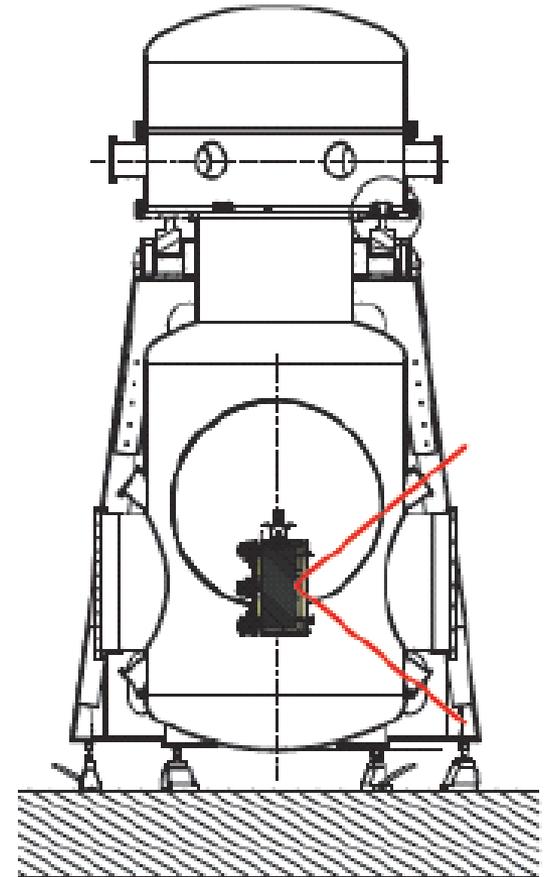
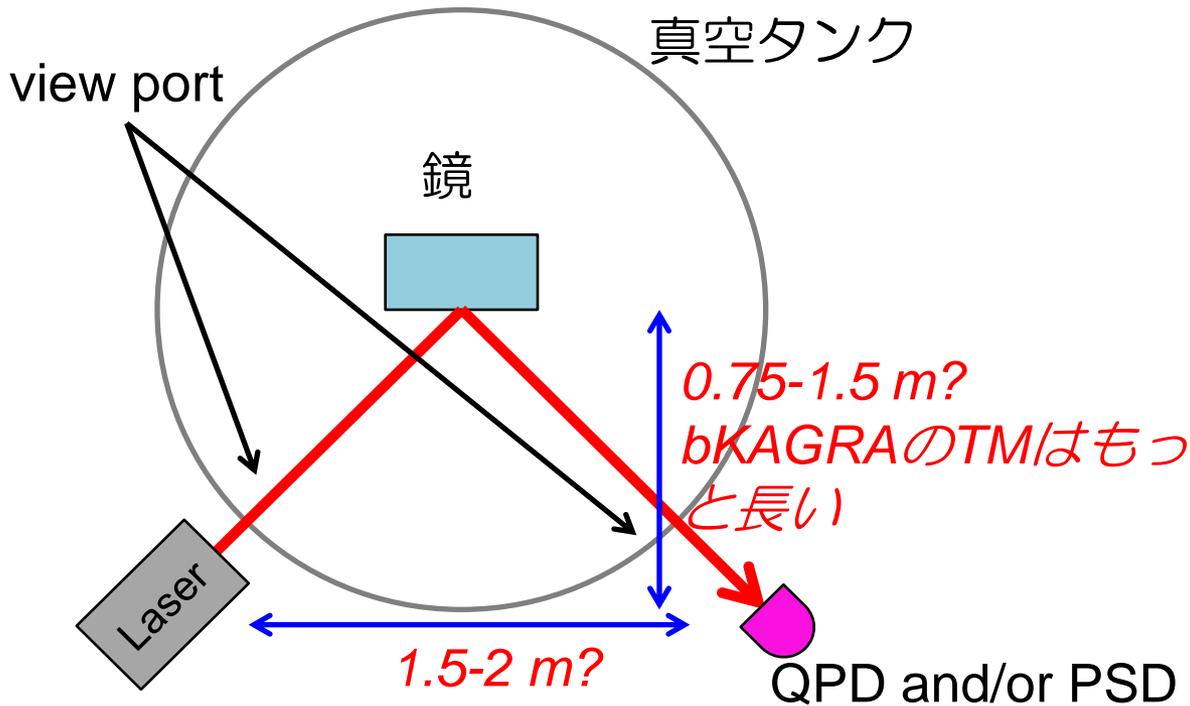
- WFS制御に移る前の初期アラインメントを取る  
WFS信号が取れる位まで十分に鏡の角度変動を抑える  
ローカル制御
- 鏡の角度ドリフトのモニタ  
OpLevの光源とQPDは鏡に比べて低ドリフトの必要

さらに

- WFS信号がうまく取れない鏡のローカル制御  
PR2, PR3, SR2, SR3に関しては最後までローカル制御  
のみの可能性あり
- コイルのアクチュエータ効率の調整  
効率を合わせてangle to lengthカップリングを減らす

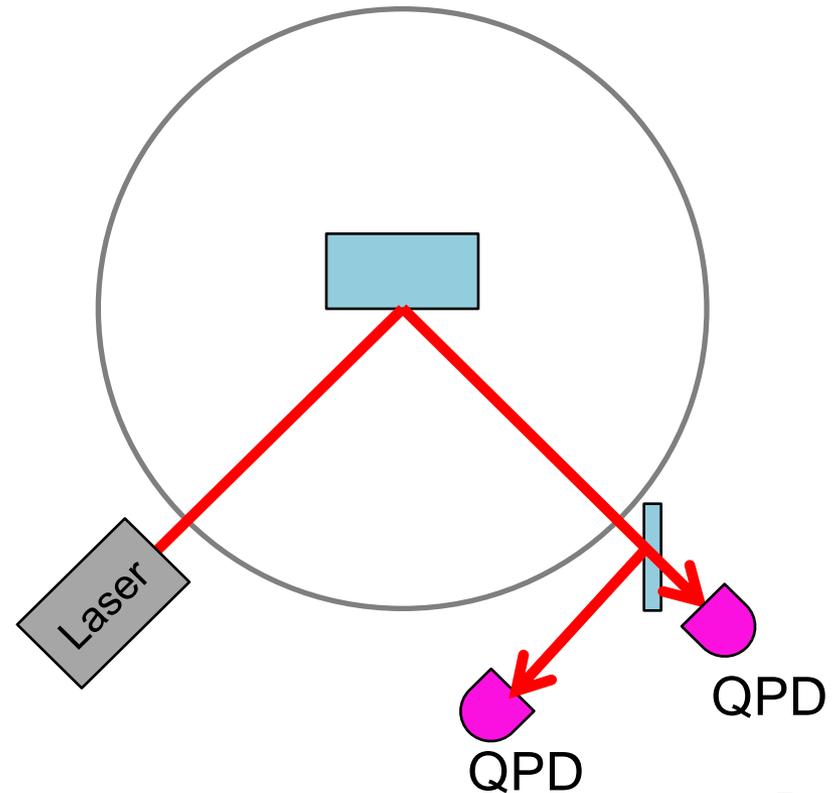
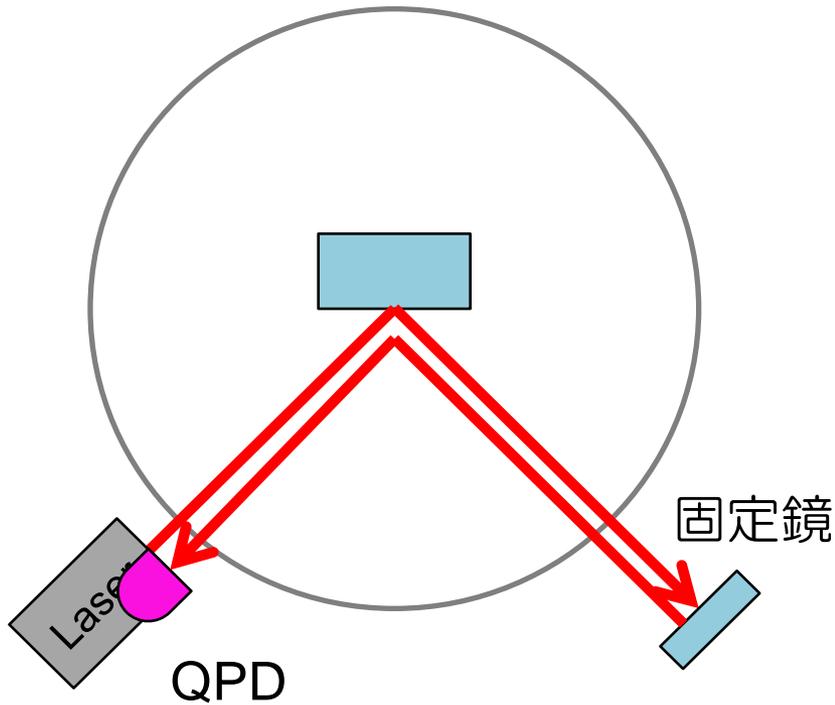
# OpLevの基本形

- bKAGRAのテストマス以外は下記のように入れるとする
- 入射角が45度に近く、鏡の並進揺れも拾ってしまう  
→ 対策しないと、感度的に厳しい



# 並進揺れ除去

- 2つの方法
  - 固定鏡で反射
  - Gouy位相を90度ずらしたQPDを2つ使う
- 入射角を小さくできるのがベストだが.....

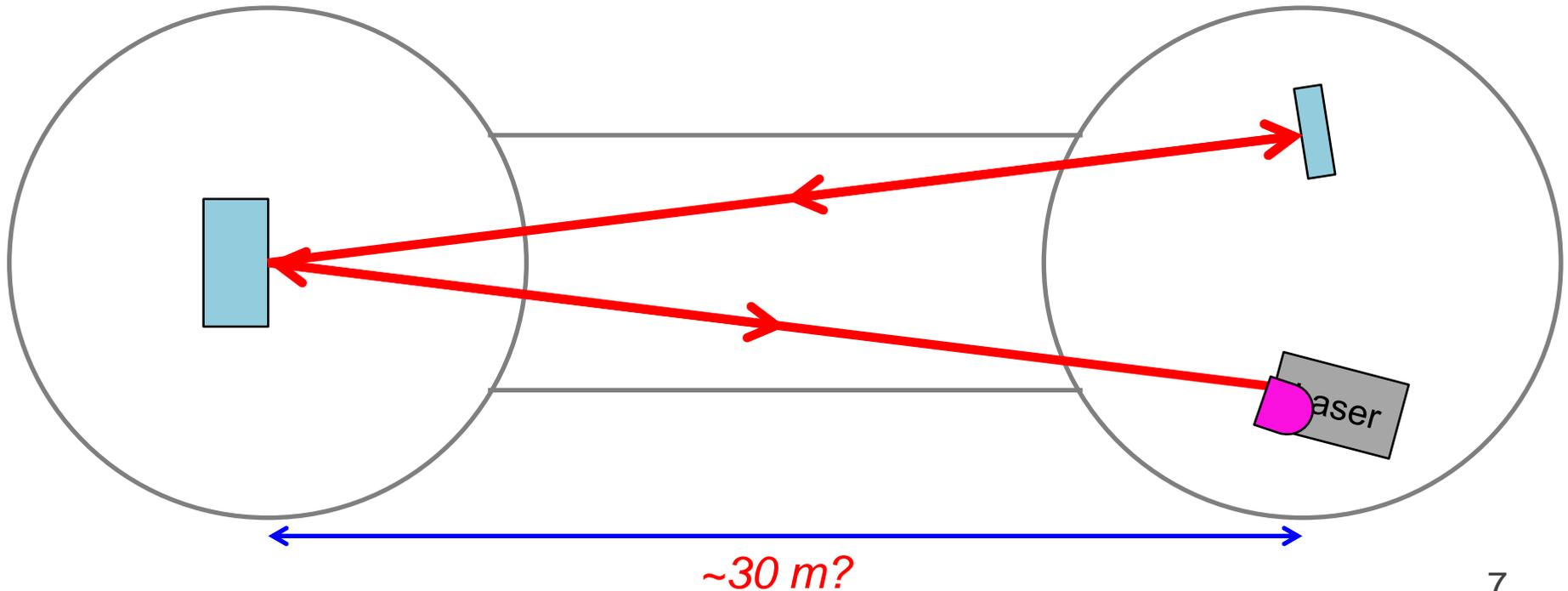


# 並進揺れ除去、どっち？

- 固定鏡で反射
    - 利点
      - 並進揺れと原理的にカップルしない
    - 欠点
      - viewportの窓での散乱がQPDに帰ってきてしまう  
OpLev用の光を非干渉なS-LEDにすればOK
  - Gouy位相2つのQPD
    - 利点
      - viewportでの反射はQPDに入らない
    - 欠点
      - 並進と回転の分離(対角化)が必要  
これをするにはcoilで鏡を揺らすしか無いが、  
逆にcoil balancingをするのがOpLevの役割では？
- 固定鏡で反射する方式で

# bKAGRAテストトマスの場合

- 30 m程度先のAO chamberが使える
- 射出部や固定鏡はchamber内に固定する(下図。デフォルト設計はこちら)か、pickoffしてAO chamberの外に出すか
- いずれの場合も射出部と固定鏡が同相で振動するならOK
- ただし、射出部と固定鏡の絶対位置は低ドリフトが必要



# 光源と射出部について

- 強度安定化された光源を使う
  - S-LEDで決定？
  - $P=5 \text{ mW}$ ,  $RIN=1e-7 / \text{rtHz}$ 程度で十分そう
  - 波長は青色がよさそう(コリメート性、かっこよさ)
  - ファイバでviewport近くまで持って行き、  
コリメータ(射出部)を地面に固定 *という感じ？*
- 真空タンクへはどこから光を入れて、どこから出すか？  
*RC鏡、BSは下から入れて下から出す？*  
*ITM, ETMはAO chamberから？*  
*(ITM, ETMもiKAGRAでは下から？)*

# OpLevによるローカル制御

- 各鏡におけるビームスポットの揺れ(BSM)が1mm以下になるまで抑える。 *1 mmの根拠は？*
- ITM, ETMは 0.1 urad 程度 (0.2 urad)  
BSは 1 urad 程度 (4 urad)  
RC鏡は 1 urad 程度 (PR3: 2 urad, PR2: 20 urad, PRM: 45 urad  
SR3: 1 urad, SR2: 10 urad, SRM: 25 urad)  
cf. aLIGOではPR2, PRM, SR2, SRMにOpLevなし (その代わりにHAMにある。+OSEMでモニタするらしい)
- ()内はOptickleによるシミュレーションによる値。次ページ参照。
- OpLevの感度のRMSが、上記を満たすようにOpLevデザインへの要求値を求める
- OpLevの雑音源
  - 強度雑音、 散射雑音
  - 地面振動射出部と固定鏡が差動変動すると雑音になる  
CMRRがOpLevデザインへの要求値  
(どれだけ「固定」するか)

# BSM行列

- 各鏡を揺らしたとき、各鏡のビームスポットがどれだけずれるかをOptickleにより計算
- この行列を見て、各鏡のBSMが1mm以下になるよう各鏡の角度揺れへの要求値を計算した

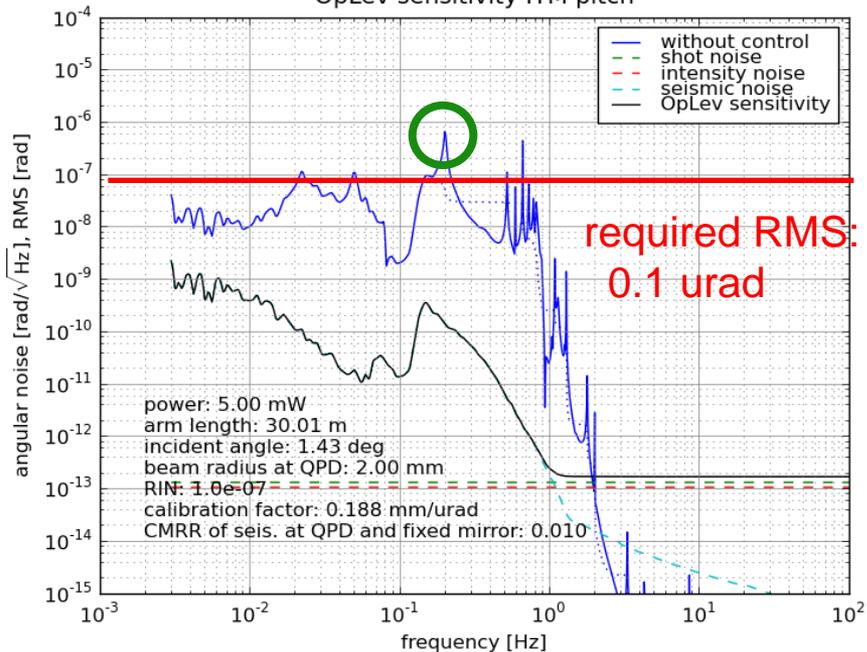
	ETMX	ETMY	ITMX	ITMY	BS	PR3	PR2	PRM	SR3	SR2	SRM
ETMX	0.0449	0.0000	0.0571	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ETMY	0.0000	0.0449	0.0000	0.0571	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ITMX	0.0571	0.0000	0.0345	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ITMY	0.0000	0.0571	0.0000	0.0345	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
BS	0.0257	0.0894	0.0160	0.0562	0.0028	0.0046	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
PR3	0.0563	0.0607	0.0355	0.0381	0.0017	0.0043	0.0005	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
PR2	0.0062	0.0067	0.0039	0.0042	0.0002	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
PRM	0.0029	0.0031	0.0018	0.0019	0.0001	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
SR3	1.4749	1.5909	0.8921	0.9578	0.0091	0.0009	0.0001	0.0000	0.0082	0.0009	0.0004
SR2	0.1627	0.1755	0.0984	0.1056	0.0010	0.0001	0.0000	0.0000	0.0009	0.0001	0.0001
SRM	0.0710	0.0766	0.0430	0.0461	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0001	0.0002

例えば、ETMXを揺らすと、SRMにおけるビームスポットが  $0.710 \times 100 \text{ mm/urad}$  ずれる

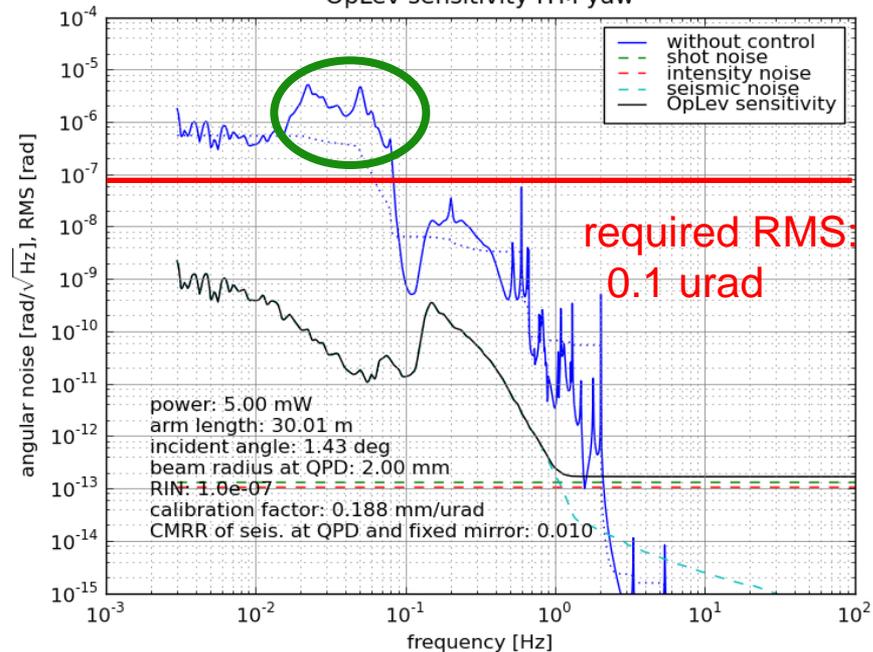
# OpLevの感度

- 次ページ
- CMRR=1/100で十分そう  
射出部と固定鏡の固定方法はあまり気にしなくてよさそう
- ってか、前ページの要求を制御なしでもほぼ満たしているサスペンションの性能良すぎじゃない？
- WFS制御に移る前のローカル制御なので、1Hz以上におけるショットノイズ混入は気にしなくてよい  
最後までローカル制御となると考える必要あり

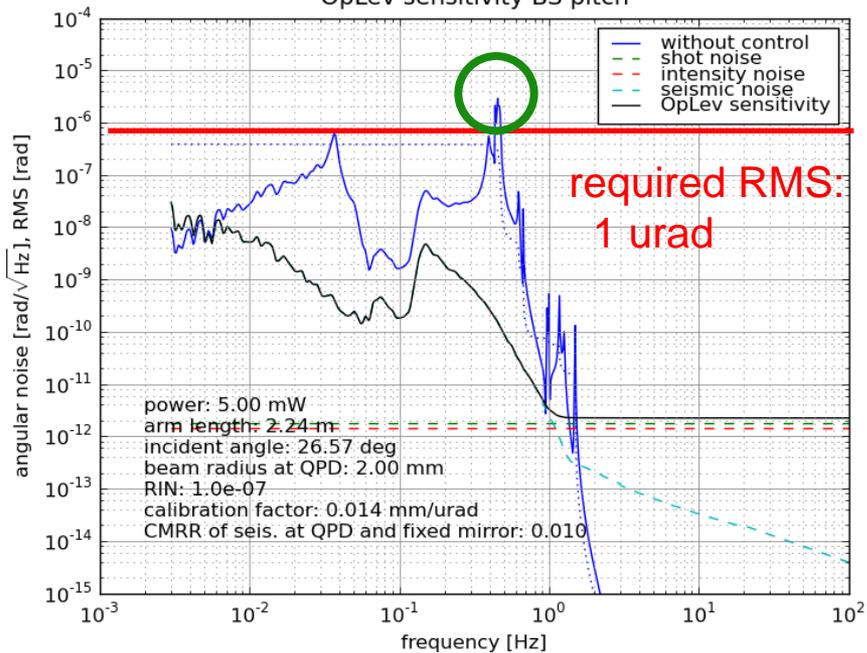
OpLev sensitivity ITM pitch



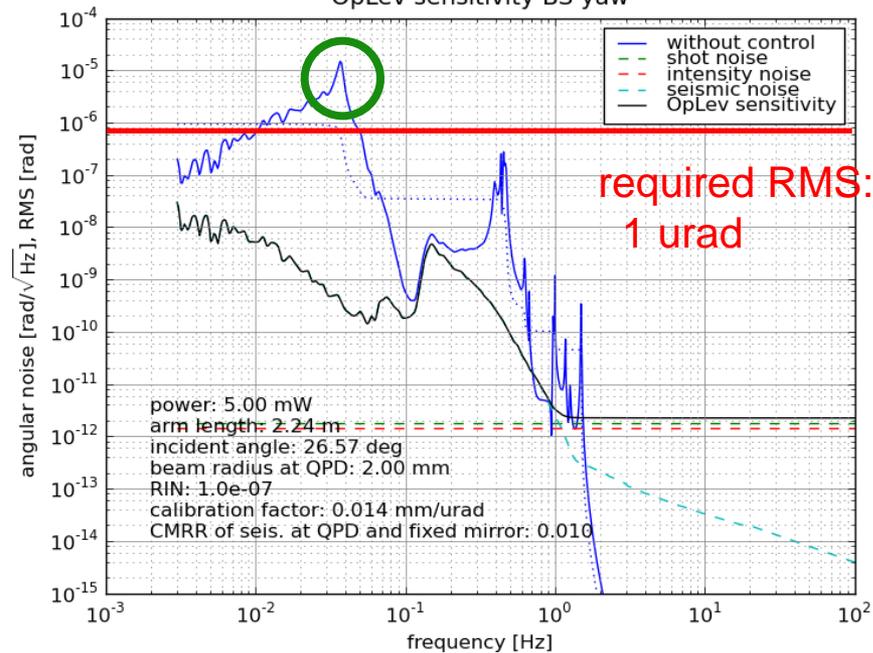
OpLev sensitivity ITM yaw



OpLev sensitivity BS pitch



OpLev sensitivity BS yaw



# OpLevによるドリフトのモニタ

- OpLevのpointingドリフトへの要求値は？
- 必要なダイナミックレンジは？  
どの程度長い間ドリフトをモニタしたいか？
- aLIGOでは.....  
1 urad/hourがOpLev系のドリフトへの要求値  
ダイナミックレンジは数mm(数百urad)程度

1 urad/hourは経験的なものらしい(Riccardo談)

Optics element	Requirement Straight/ /Folded interferometer [μradian]	(Half) Arm-length (straight/ folded) [m]	Required spatial resolution [μm]	Required Spotsize (2w) [mm]	Launching Telescope diameter [mm]	Launching/ Detection height [m]	Dynamic range [mm] / [μradian]	Expected sensitivity / stability [nrad] / [μrad]
ITM	2.56/2.54	38.2	89	4	40	1.1 / 2.4	±7/200	1.3/ 1
ETM	2.3/2.28	5.7/3.3	14/7	2	25	1.1 / 2.4	±5/330	3.5/ 1
PR3	2.74/2.81	13.8	27	2	25	.8 / 2.7	±5/140	1.2/ 1
SR3	1.9/2.02	14.4/13.7	26	2	25	.8 / 2.7	±5/140	1.2/ 1
BS	2.78/2.85	1.9/2.1	5.2	1	12	1.5 / 1.9	±4/500	5/ 1
FMX	Na/2.85	1.9	5.2	1	12	1.9 / 1.9	±4/500	5/ 1
FMY	Na/2.85	1.9	5.2	1	12	1.9 / 1.9	±4/330	3.3/ 1
HAM 2-3-4-5-8-9-10-11	Na	13.6		2	25	~12		13

LIGO-T1000048-v4 →

# Pointingドリフトへの要求値

- 1日放置しても、ロックがかけられる程度
  - ビームが重ならないレベルになってしまわない程度
  - ビーム径/腕長  $\sim 3 \text{ cm} / 3 \text{ km} = 10 \text{ urad}$
  - $10 \text{ urad} / 24 \text{ h} \sim 0.4 \text{ urad/h}$
- ということで、OpLevのpointingドリフトへの要求値は  
 $0.4 \text{ urad/h}$  ..... *でいいですか？*
- あとは、これを満たすような射出部の選定、固定系の設計を行えばよい

# ダイナミックレンジ

- OpLevのキャリブレーション係数  
テストマス用が 0.12 mm/urad  
BS, RC鏡用が 0.014 mm/urad
  - どの程度のスケールで鏡がドリフトするのかわからないが、ダイナミックレンジとして、鏡の $\pm 100$  urad程度が必要だとしたら.....
    - テストマス用  $\pm 12$  mm
    - BS, RC鏡用  $\pm 1.4$  mm
- テストマス用にはダイナミックレンジの広いPSDを組み合わせる必要あり  
BS, RC鏡用にはQPDのみで十分そう

# まとめ

- OpLevは固定鏡を用いる方式でOK?
- それだと、OpLevの感度はそこまで気にしなくていい  
RIN=1e-7 /rtHz程度の光源で、射出部と固定鏡の相対位置がreasonableに固定されていればOK
- 結局OpLevに求められるのはほとんど低ドリフト性のみ?  
Pointingドリフト 0.4 urad/h 以下のものを作る
- 射出部と固定鏡をどこに固定するかは、低ドリフトなら基本的にどこでもいい