

# Hanfordに行ってきました ～2014冬～

道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
安東研究室 博士課程3年

# 概要

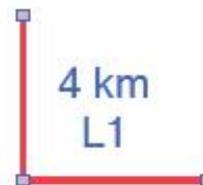
- 出張先: LIGO Hanford観測所 (Richland, WA)
- 期間: 2014年1月14日-3月14日
- 目的: aLIGOのコミッショニングに参加してKAGRAへの経験を積むこと
- 費用負担先:
  - 東京大学フォトンサイエンス・リーディング大学院(ALPS)海外派遣プログラム
  - aLIGO
- 宿泊場所:
  - PNNL Guest House



# LHO所在地

- アメリカ合衆国  
ワシントン州  
リッチランド

LIGO: Laser Interferometer  
Gravitational-wave  
Observatory



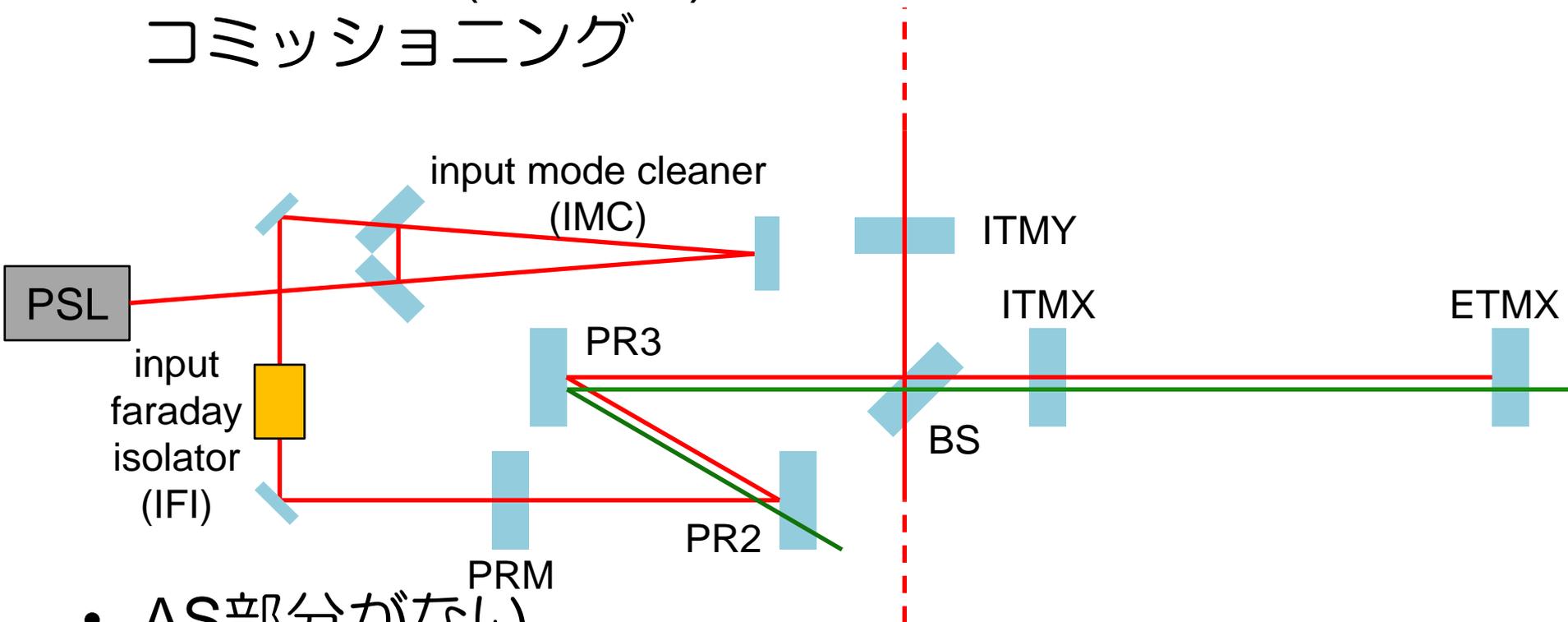
Livingston, LA



# LHOの状況

- IMC終了
- PRMIとX腕(HIFO-X)のコミッショニング

ETMY



- AS部分がない
- ITMYが仮のもので、ETMYインストール中
- ETMの緑透過率が予定より高い(5%→36%)

# 滞在中に行われたこと(前半)

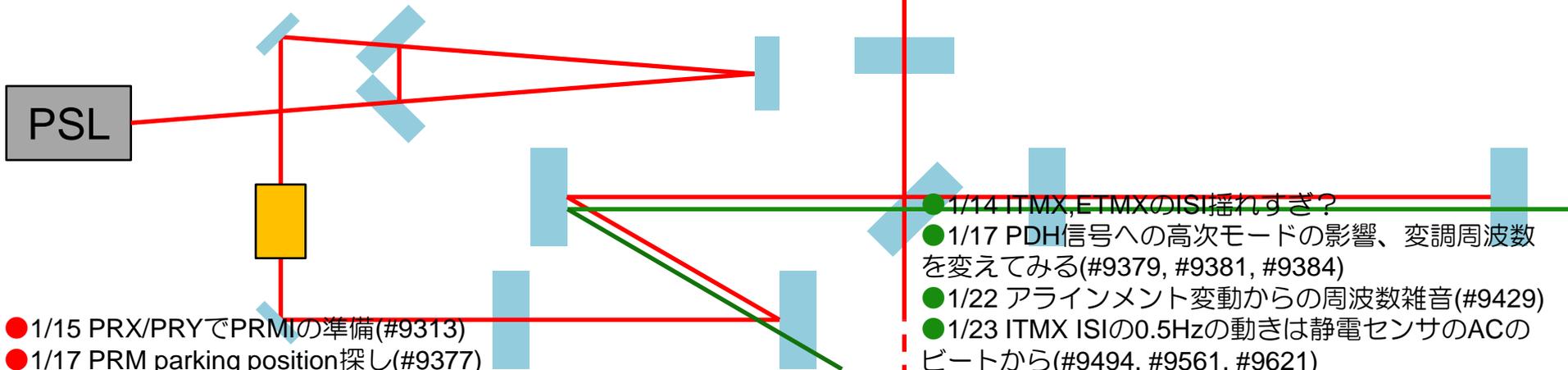
See corresponding LHO alog for more details

<https://alog.ligo-wa.caltech.edu/aLOG/>



- 1/14 1Wから10W入射に増やす準備(#9285,#9306)
- 1/23 ダンパー完成、10W入射に(#9521)
- 1/30 PDのチェック(#9630)
- 2/12 Optickle, FINESSEのバグが見つかる

- 1/23 ETMYの緑反射率測定し、結果68%(#9520)
- 2/11 TMSYのアラインメント(#9981)



- 1/15 PRX/PRYでPRMIの準備(#9313)
- 1/17 PRM parking position探し(#9377)
- 1/20 BS L2Pなどアクチュエータの対角化(#9396など)
- 1/21 PRMI最初のロック成功(#9421)
- 1/22 PR2のcoil balancingなど(#9453など)
- 1/27 10W入射での初のPRMIロック最長8分(#9591)
- 1/31 ITMY ring heaterをつけて50分ロック(#9736)
- 2/3 PRMIの6時間ロック(#9741)
- 2/4 最初のPRCL, Schnupp asymmetry測定(#9776)
- 2/7 PRMI guardianが作られる(#9920)
- 2/9 PRMIの最初の3fロック30分成功(#9935)

- 1/14 ITMX,ETMXのISI揺れすぎ?
- 1/17 PDH信号への高次モードの影響、変調周波数を変えてみる(#9379, #9381, #9384)
- 1/22 アラインメント変動からの周波数雑音(#9429)
- 1/23 ITMX ISIの0.5Hzの動きは静電センサのACのビートから(#9494, #9561, #9621)
- 1/23 ISI等の調整で6時間のgreen lock成功(#9518)
- 1/25 ALS CARM handoff成功(#9561)
- 1/29 サイドバンドを用いて共振器長の精密測定(#9626)
- 1/30 00にずっとロックするための角度揺れへの要求値を実測(#9653)
- 2/11 光てこからの周波数変動の見積(#10003)
- 2/12 WFSを導入することに(#10045) 5
- 2/14 周波数変動測定、90Hz RMS (#10090)

# 滞在中に行われたこと(後半)

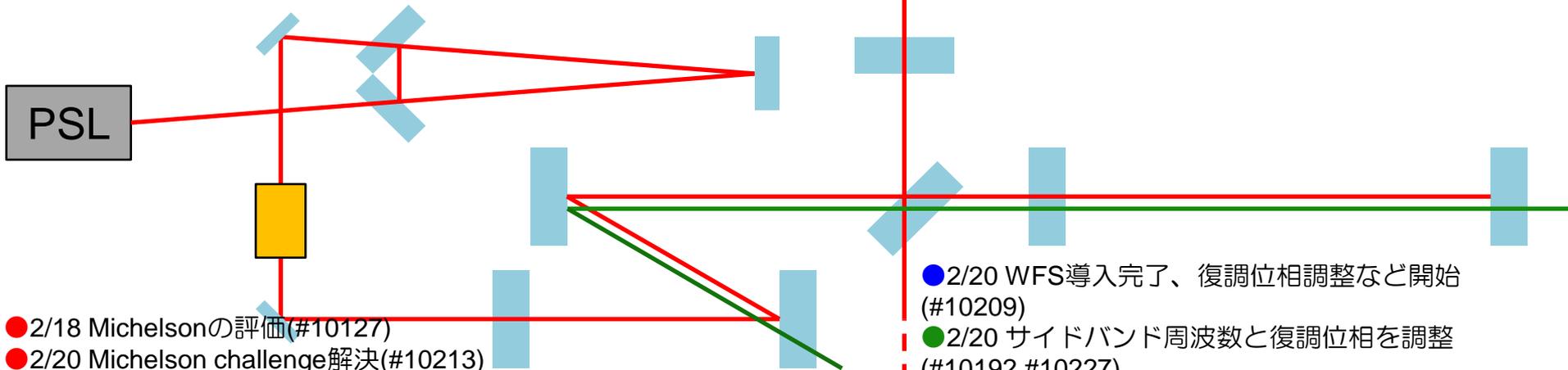
See corresponding LHO alog for more details

<https://alog.ligo-wa.caltech.edu/aLOG/>



- 2/25 ramp matrix導入(#10335)
- 2/26 PRCL測定のための準備開始(#10345)
- 2/27 HAM2/3にguardian導入(#10394)
- 3/9 PRCL測定に成功(#10642)
- 3/9 PRC Gouy位相測定に成功(#10729)

- 2/24 ETMYが真空槽内に入る(#10287)



- 2/18 Michelsonの評価(#10127)
- 2/20 Michelson challenge解決(#10213)
- 2/26 PRMIのdither alignment(#10352)
- 3/1 PRMIの最初のnoise budget(#10441)
- 3/2 PRMIのPRGは1.6(#10442)
- 3/2 PRYを用いてPRMとBSのbalancing(#10450)
- 3/2 ring heaterを入れるとPRMIのPRGは6(#10472)
- 3/5 PRCL/MICH対角化してPRMIロック(#10559)
- ● 3/5 ALSで腕長変えながらの3f lockingに成功(#10570)
- 3/11 PRCL/MICH対角化の精度確認(#10674)
- 3/12 PRMI sensing matrix測定(#10725)

- 2/20 WFS導入完了、復調位相調整など開始(#10209)
- 2/20 サイドバンド周波数と復調位相を調整(#10192,#10227)
- 2/20 WFS sensing matrix測定(#10216)
- 2/24 WFSループ閉じる(#10293)
- 3/5 周波数変動再測定で30-70Hz RMS(#10511)
- 3/7 ITMX, ETMXのサスペンション伝達関数測定続く(#10607など)
- ● 3/9 初期アラインメントの手順変更(#10636)
- 3/11 角度揺れの周波数変動へのカップリング測定(#10668)

# 今回のお話

- HIFO-Xコミッショニング
- PRMIコミッショニング
- Simulink Noise Budgetの紹介
- Guardianの紹介
  
- 少しだけCommissioning Workshop報告  
2014年2月3-7日にCaltechで開催された  
現代制御がテーマ

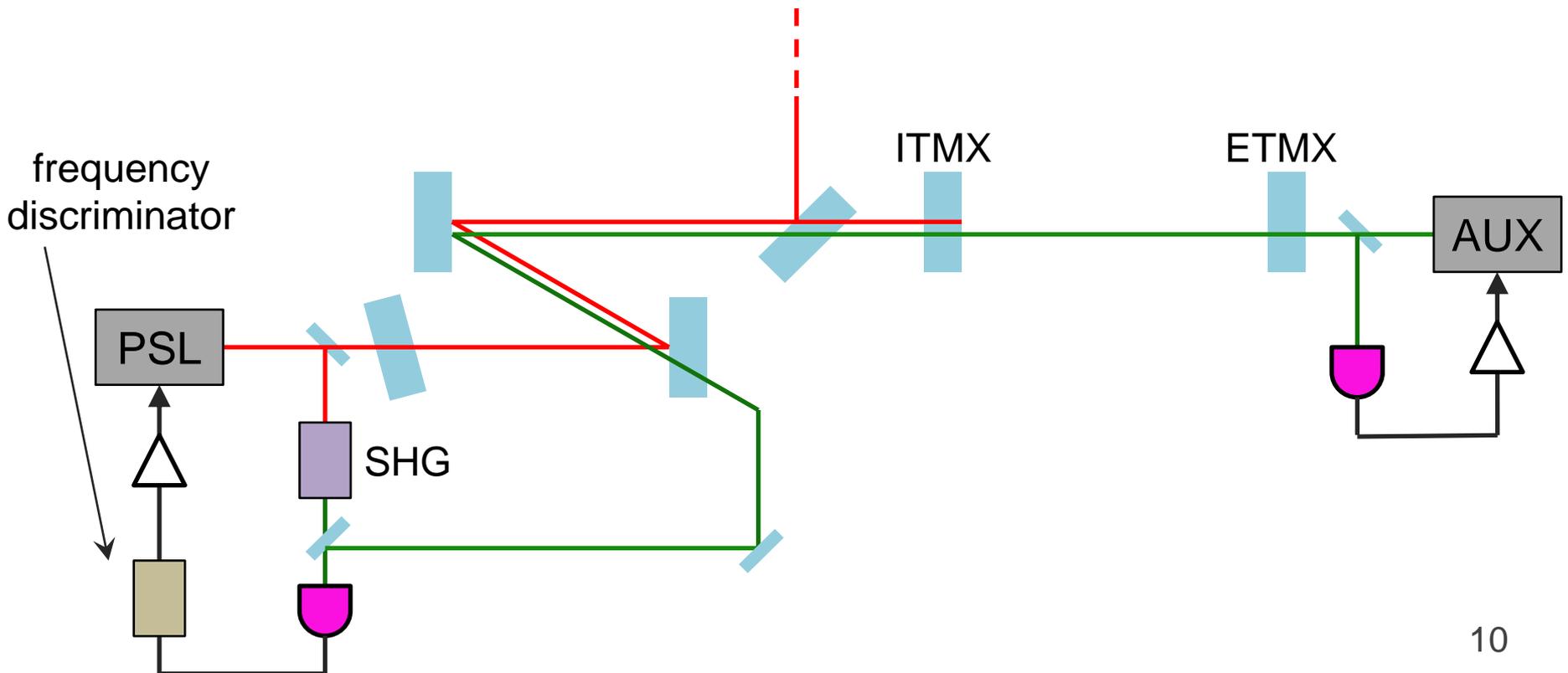
**HIFO-X**

# HIFO-X状況の概要

- 目標: 数Hz RMSの周波数安定度の実現  
(HIFO-Yでは6 Hz RMSを達成)
- 課題:
  - 鏡の角度揺れが大きい
  - フィネスが設計より小さい
  - 安定に00モードにロックしない
- 行われたこと
  - 地面振動防振装置(ISIなど)の調整
  - ALS WFSの導入
  - サイドバンド周波数、復調位相の調整
- 残された課題
  - 安定にロックはかかるようになったが、依然として周波数変動が大きい (~100Hz RMS)

# HIFO-Xのセットアップ

- 倍波光(緑色光)を用いた補助的制御  
ALS = arm length stabilization
- PSL光の周波数を腕長に合わせて安定化
- DRMI部分の制御が腕の影響を受けないようにする

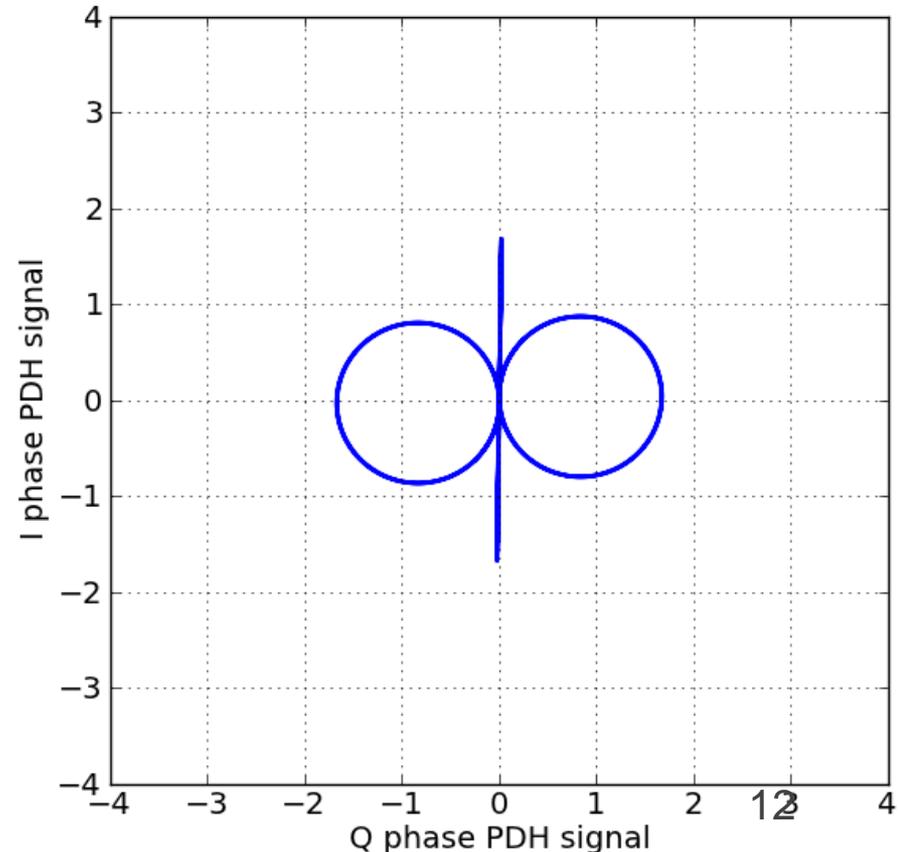
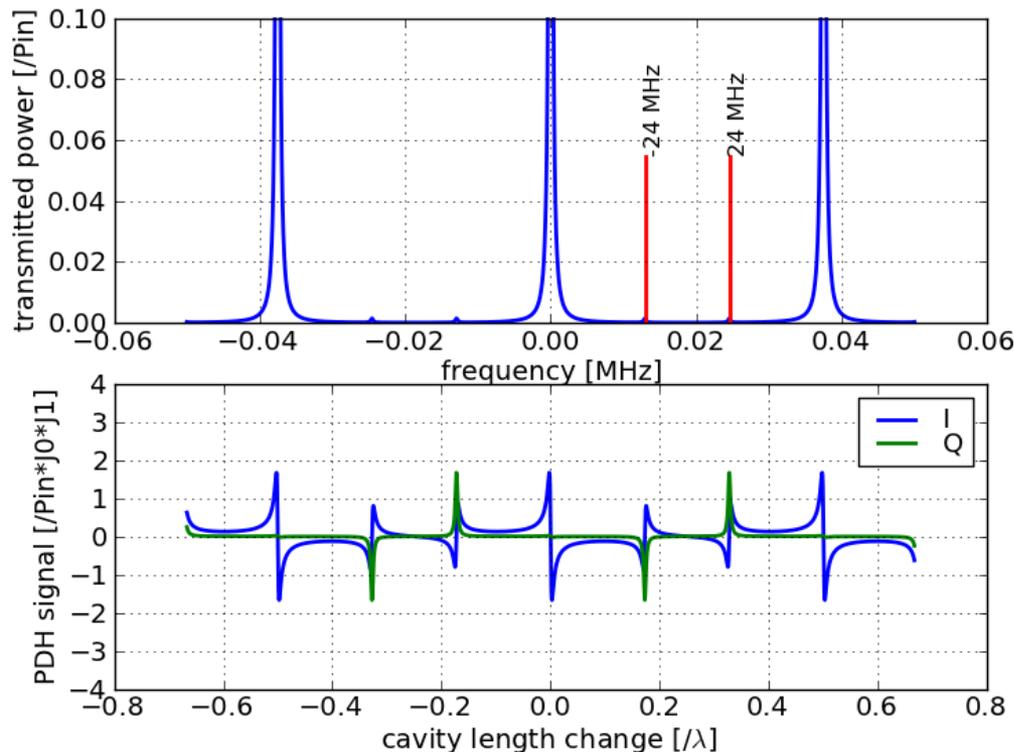


# ETMの緑透過率が高い問題

- 設計値 5 %、実際は36 %  
コーティング会社からの仕上がり時点で透過率が高かったが、チェック漏れ
- 緑フィネスが設計値102に対し、14しかない
- PDH信号に高次モード、サイドバンドの影響が大きく出る
- 鏡が角度揺れをしていると、すぐモードホップする(00モードではなく、高次モードにかかりやすい)
- HIFO-Yの時はITM-ITM共振器を使っていたので問題にならなかった

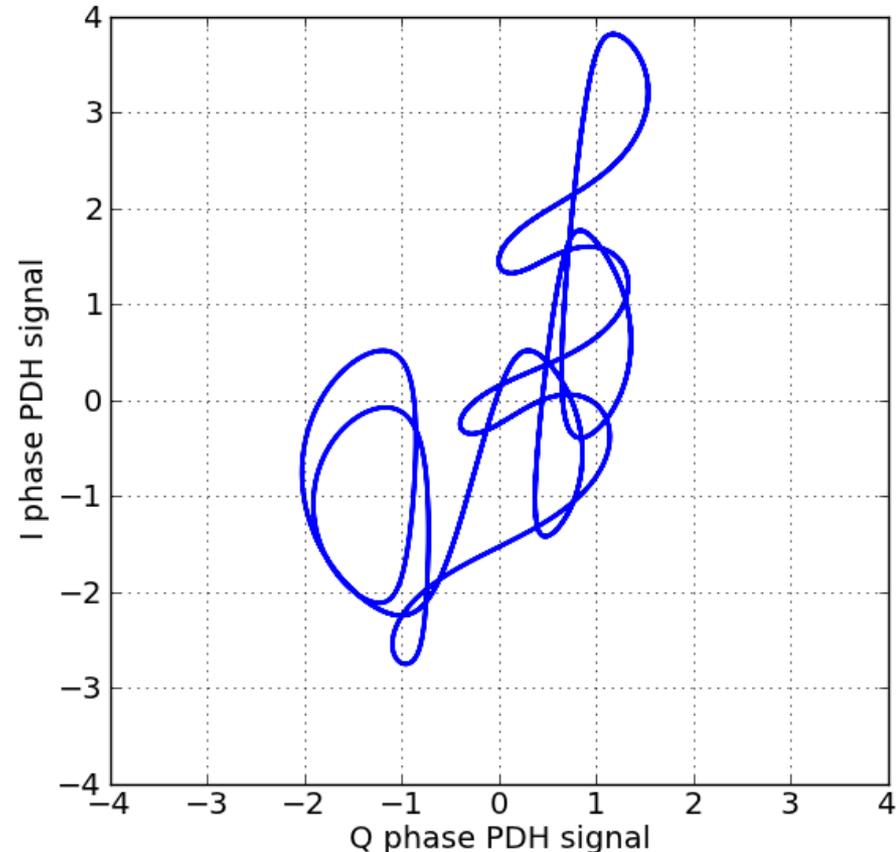
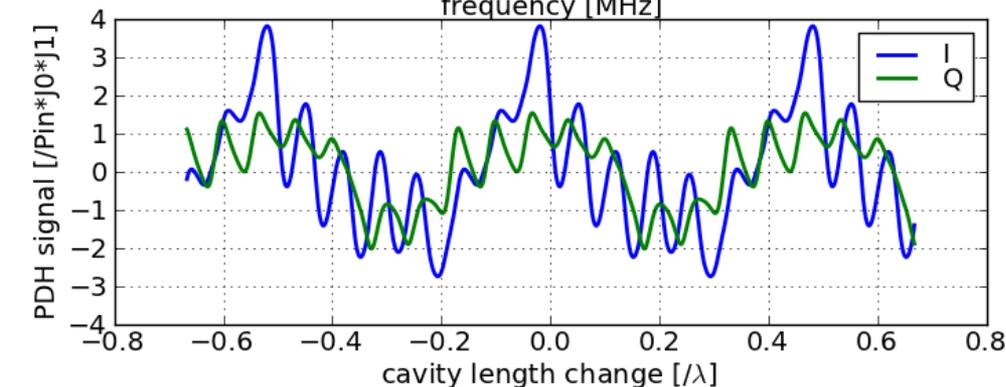
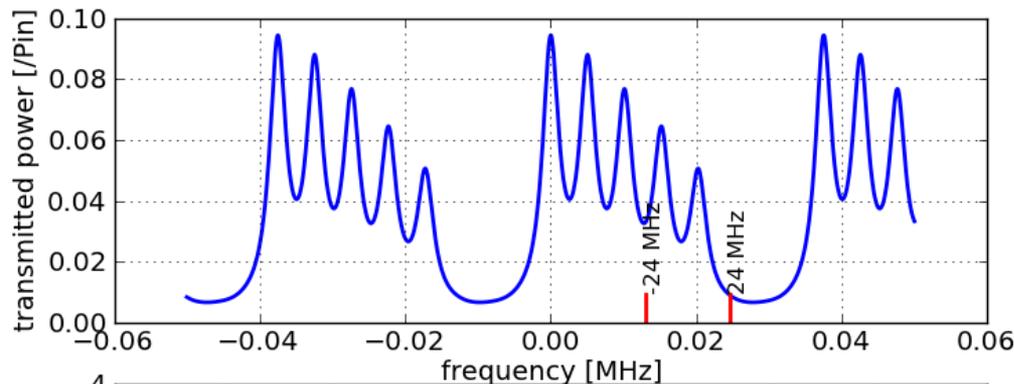
# PDH信号のIQプロット

- 理想的には%のような形になるはずなのにそうならない ([動画](#))
- フィネスが設計値通りで、ミスアラインメントがない場合



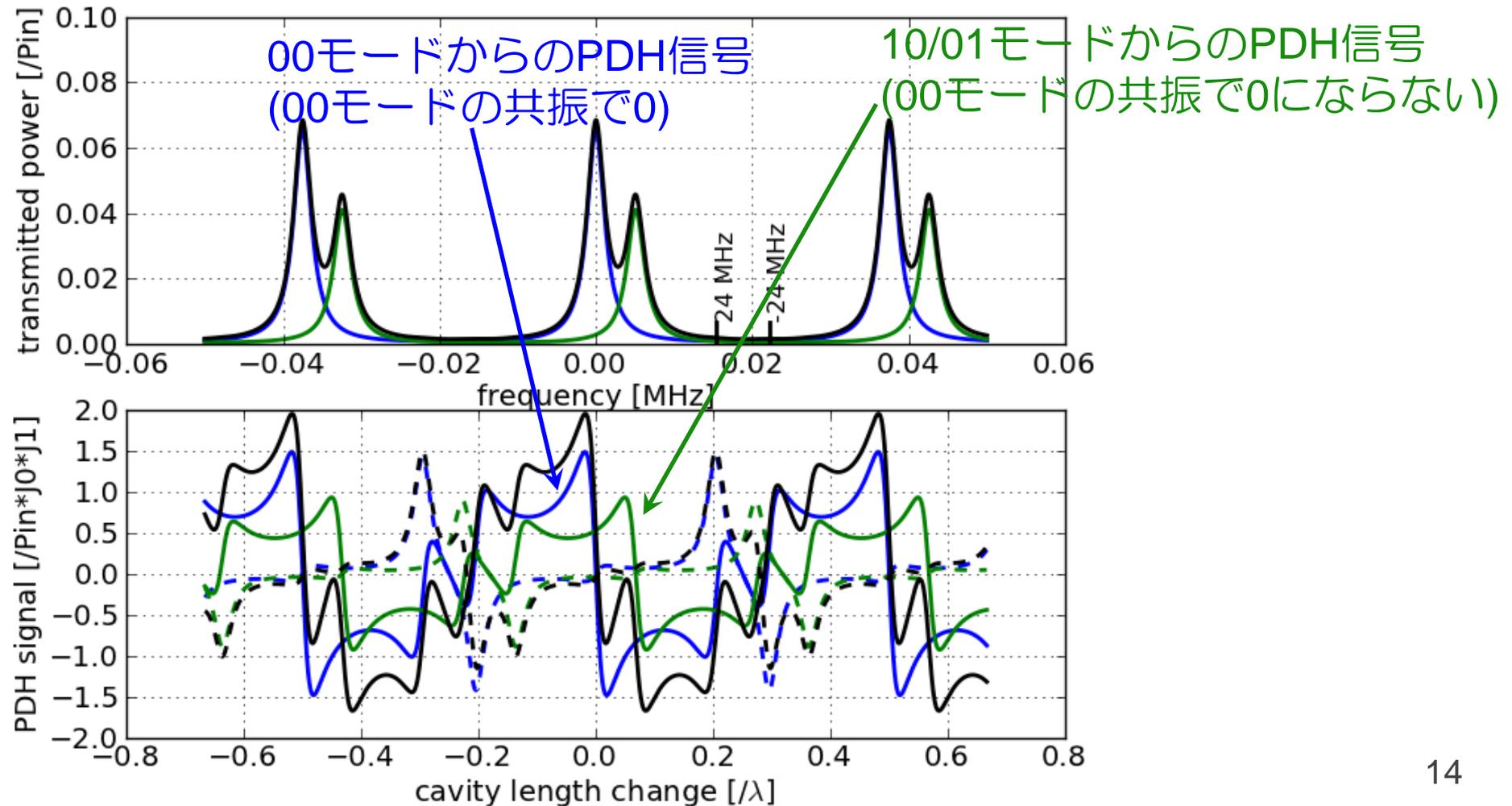
# PDH信号のIQプロット

- 理想的には%のような形になるはずなのにそうならない ([動画](#))
- フィネスが低く、ミスアライメントもある場合  
→動画と似てる！



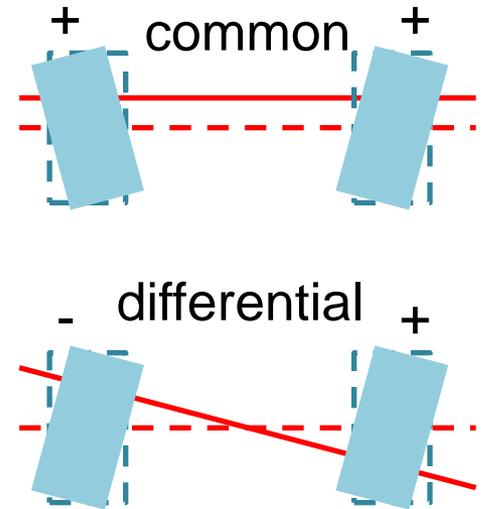
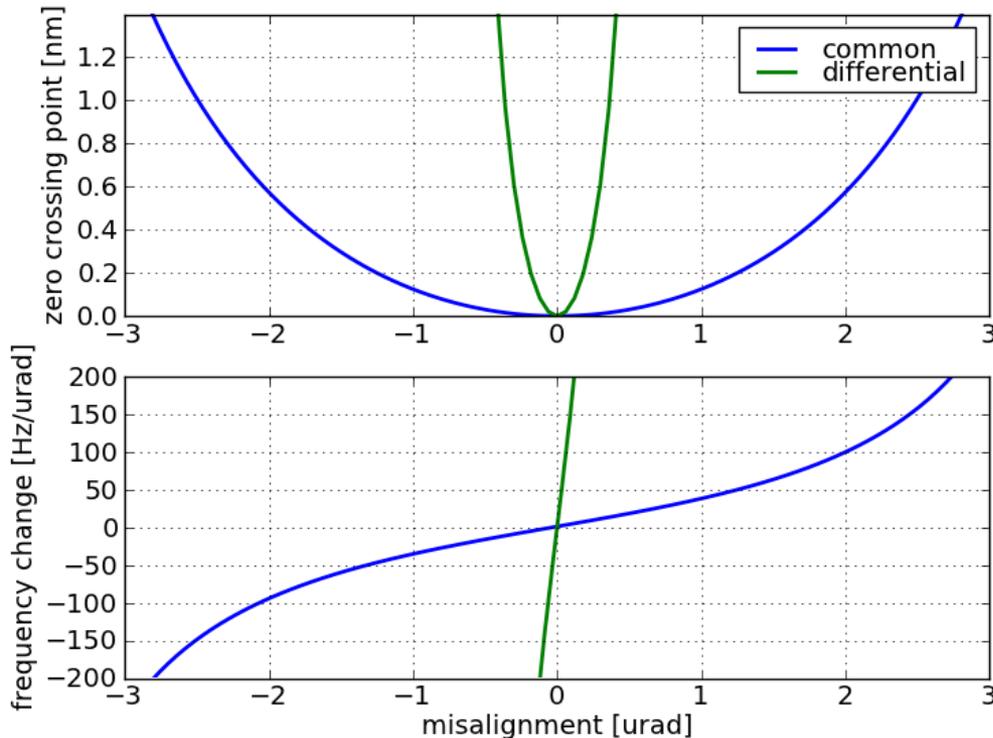
# 高次モードのPDH信号

- 低フィネスでは高次モードのPDH信号が00モードのPDH信号と混ざる



# 高次モードによる周波数雑音

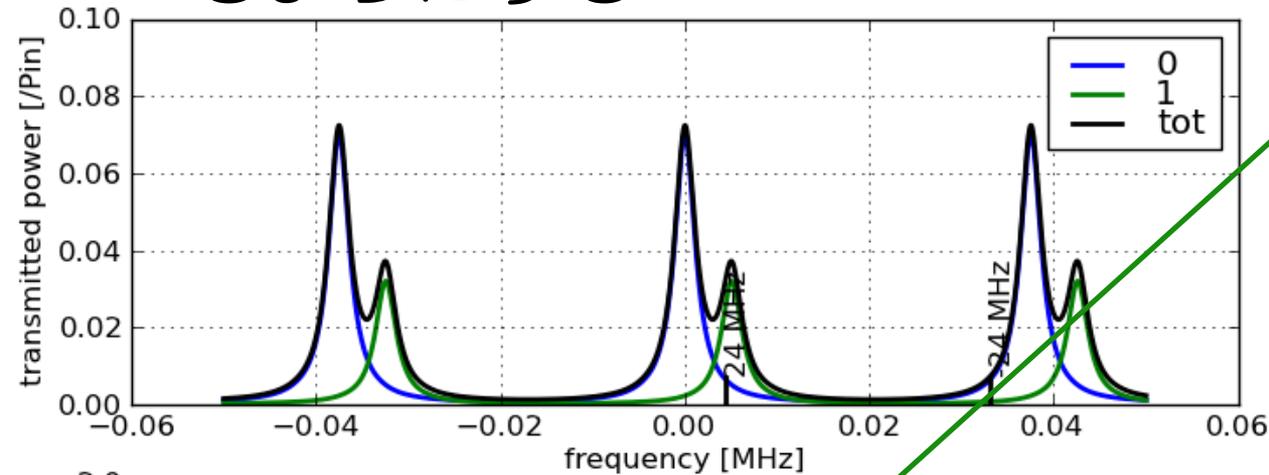
- 鏡が傾く→アライメントがずれる→高次モードの大きさが変わる→PDH信号のゼロ点が変わる→共振器長に対するレーザーの周波数が変わるという機構の周波数雑音が存在する！
- アライメントの2次の効果



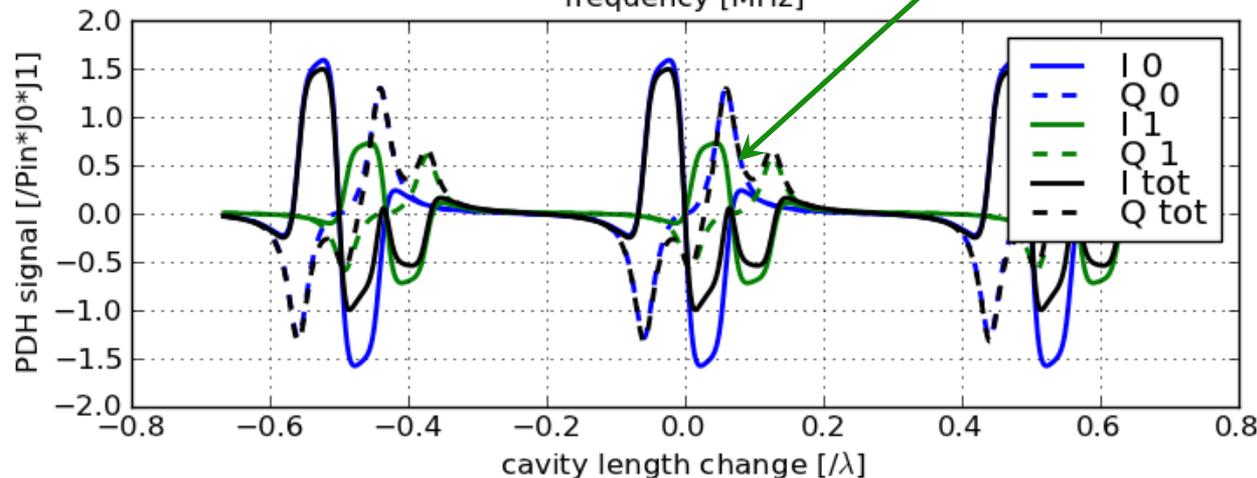
もしDC的なミスアライメントが0.1 uradで、変動が0.1 urad RMSだとすると、周波数雑音は15 Hz RMS

# 影響を小さくする方法

- サイドバンド周波数と復調位相を調整して、10/01モードからのPDH信号が00共振でゼロになるようにする



10/01モードからのPDH信号

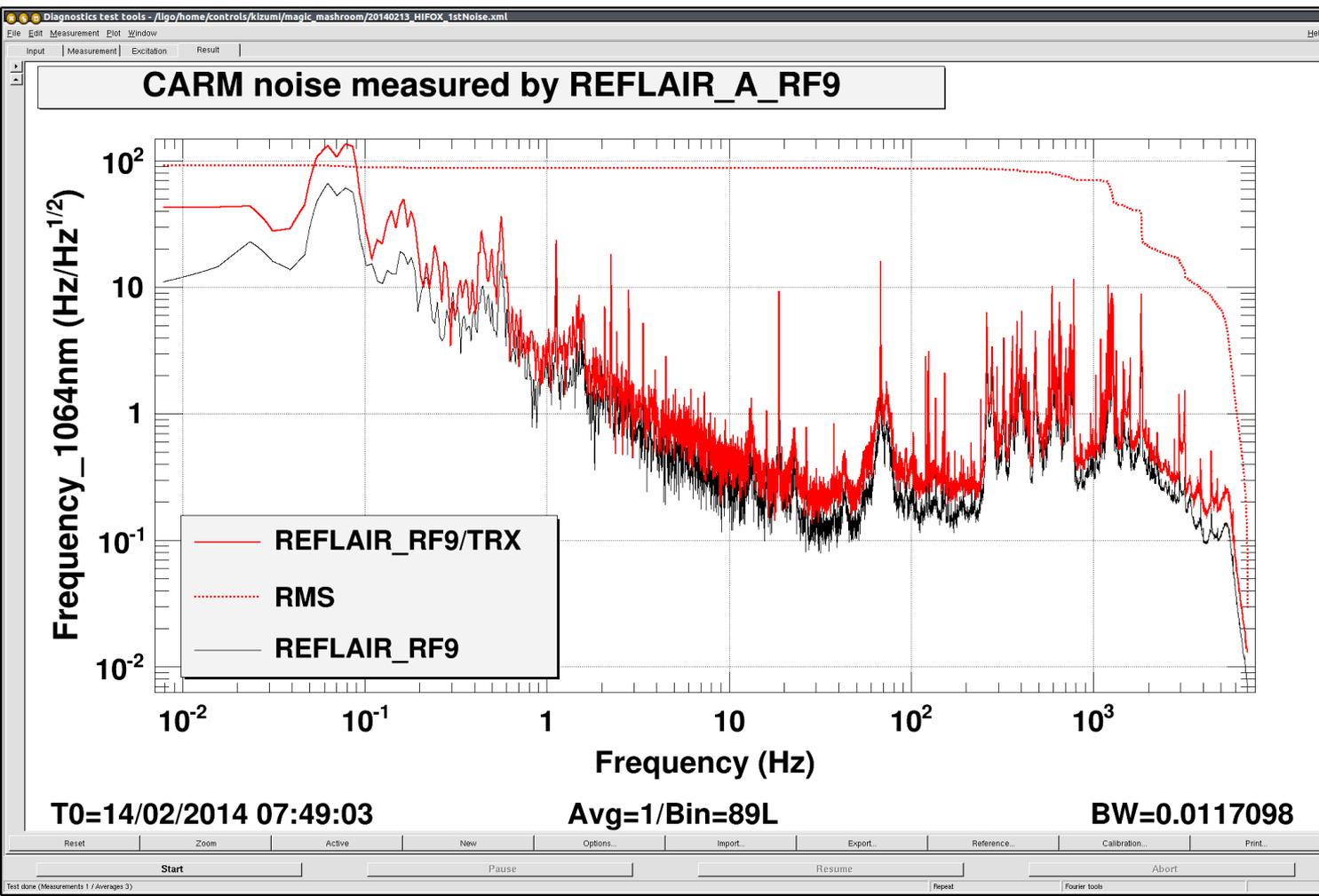


# 結局どうしたか

- サイドバンド周波数を5%(250 Hz)以下、復調位相を5 deg以下の精度で合わせれば周波数雑音を数 Hz RMS以下に抑えられることを計算で示した
- が、何を基準に合わせればいいのか不明確
- 結局経験的に(?)サイドバンド周波数と復調位相が調整された
  - 劇的な改善はなし
- 測定された周波数変動は90 Hz RMS程度で計算よりも大きかった
- ALS WFSも導入されたが、劇的な改善は未だなし

# 測定された周波数変動

- ALSで腕とPSLの周波数を合わせ、PSLのPDH信号を測定(out-of-loop評価)



PDH信号の線形レンジを広げるためにTRXで割った

**PRMI**

# PRMI状況の概要

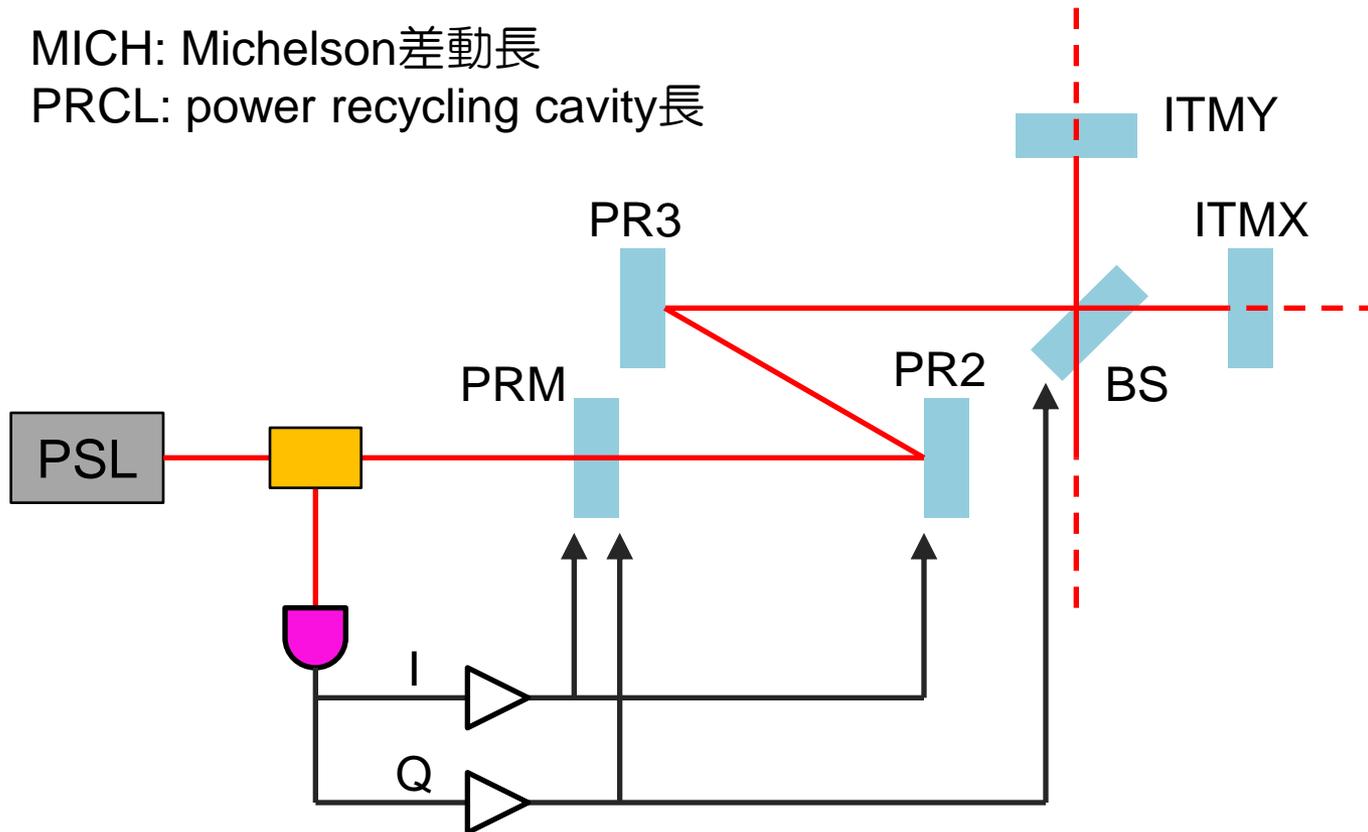
- 目標: 「変なこと」が起こっていないかの確認
- 行われたこと
  - アクチュエータの対角化、較正
  - PDの較正
  - 3f lockingの実現と腕長変化でロックが維持できるかの確認
    - 成功
  - LSC sensing matrixの測定とモデルとの比較
    - だいたい合ってる
- 残された課題
  - power recycling gainが予想より低い

# PRMIのセットアップ

- REFL Iを使ってPRCL、 REFL Qを使ってMICHのエラー信号を取得(ASがない)
- PRCLはPRMとPR2に、 MICHはBSとPRMに返す

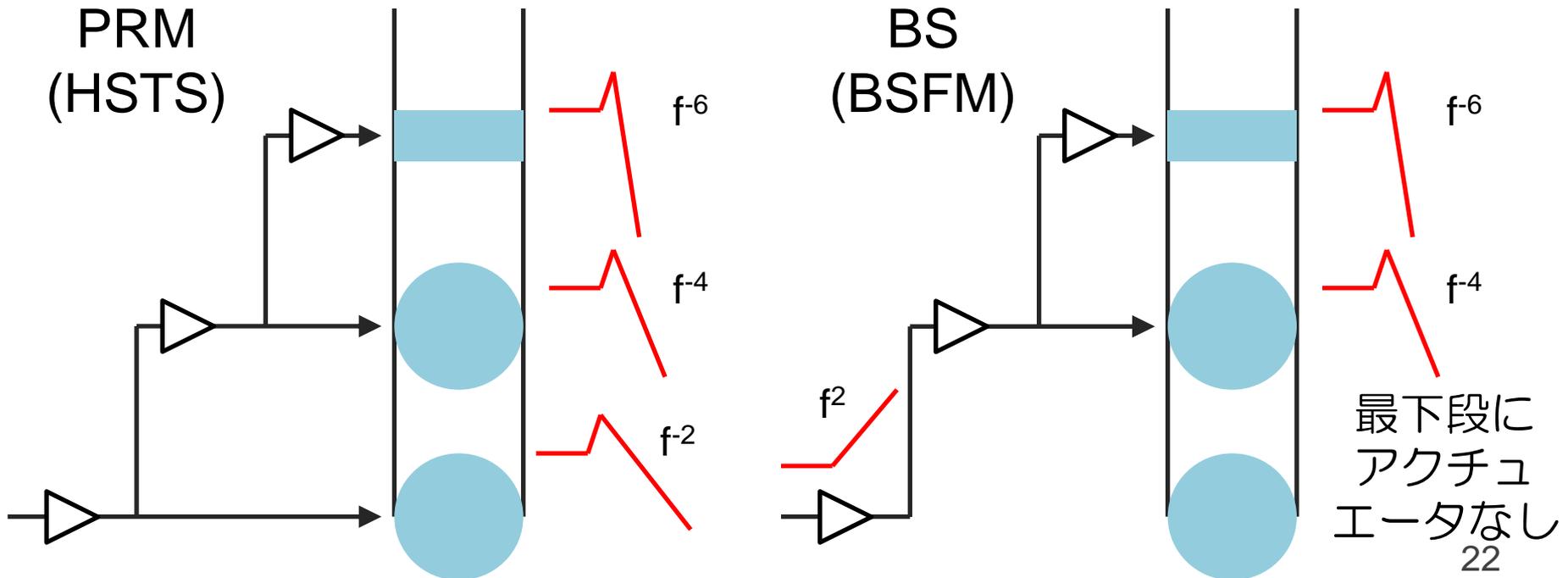
MICH: Michelson差動長

PRCL: power recycling cavity長



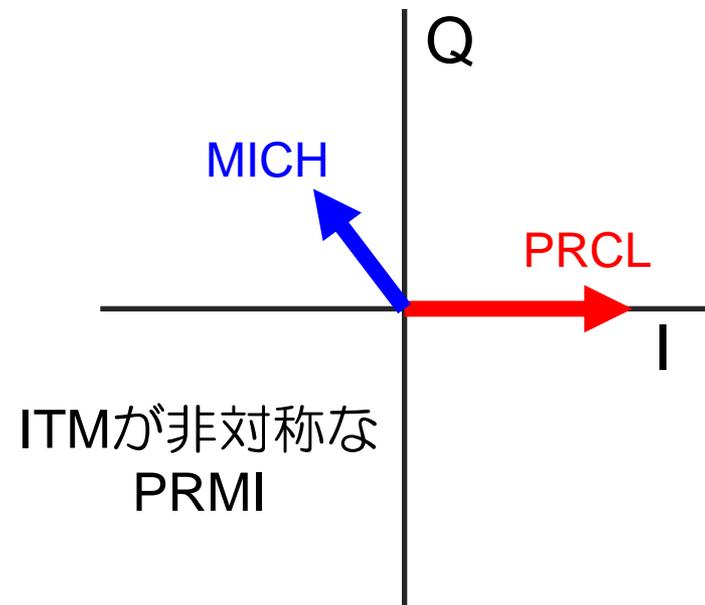
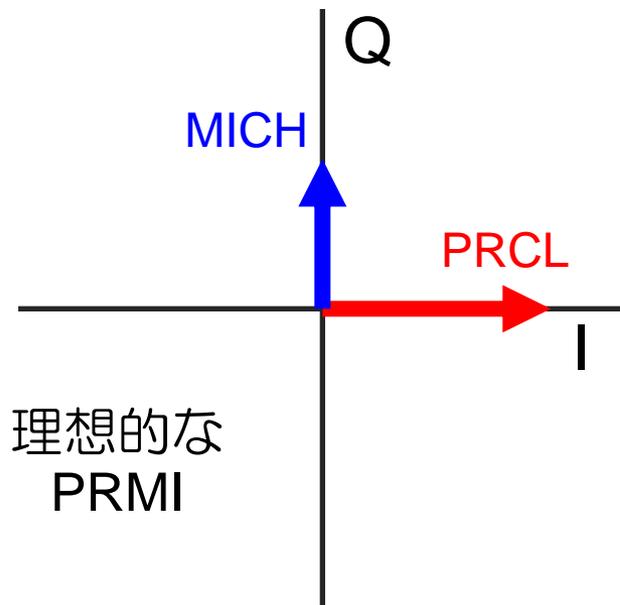
# MICHのアクチュエータ

- BSを振るとPRCLも変化してしまう  
→ PRMを合わせて振ることでキャンセルする必要がある
- BSとPRMは違うサスペンション  
→ フィルタを作ってバランスを取る必要あり



# エラー信号の分離

- PRCLはREFL Iに出る
- MICHは理想的にはREFL Qに出るが、LHOではITMYが仮のもの(曲率がETMYで、ARなし)  
→ MICHが中途半端な位相に出る
- PRCLがQに出ないように復調位相を合わせる



# Sensing Matrix測定

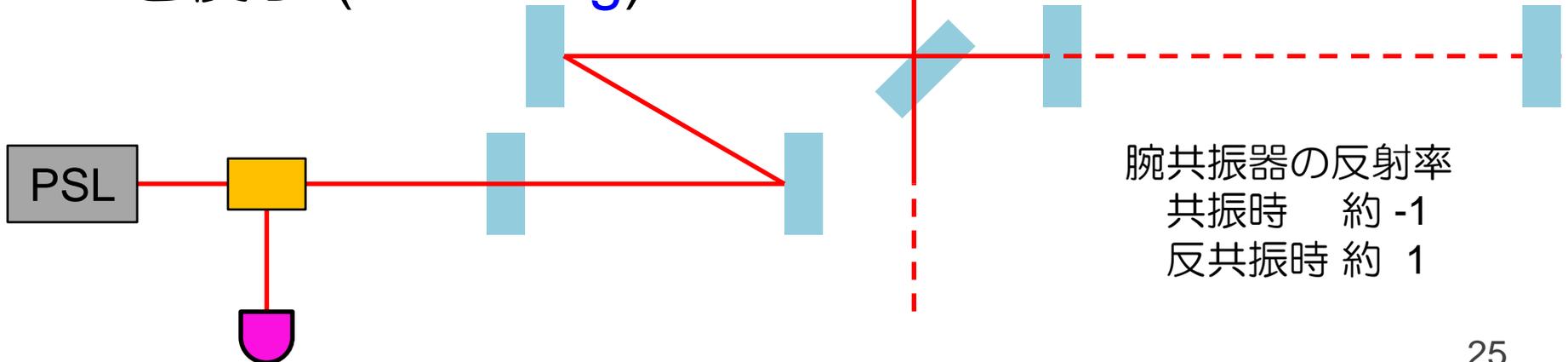
- PRCLは実測がモデルの3割程度
- MICHは実測がモデルの7割程度(REFL135以外)
- 低パワーリサイクリングゲインでは説明できない  
設計値が 58、LHOのためITMYで ~20、実測 6  
PRCL信号は $\sqrt{G_{pr}}$ に比例

	PRCL	MICH
REFL_9_I	4.8e+6    1.5e+6 +/- 2.2e+4	4.1e+4    4.9e+4 +/- 1.0e+3
REFL_9_Q	9.4e+2    -2.1e+3 +/- 4.2e+2	4.1e+4    -1.7e+4 +/- 2.2e+2
REFL_45_I	1.6e+6    5.4e+5 +/- 7.3e+3	1.4e+4    1.7e+4 +/- 4.0e+2
REFL_45_Q	-4.2e+2    2.6e+3 +/- 6.8e+2	-6.7e+4    -3.0e+4 +/- 2.0e+2
REFL_27_I	2.7e+4    7.7e+3 +/- 1.1e+2	1.4e+2    1.6e+2 +/- 3.3e+1
REFL_27_Q	1.5e+1    -2.2e+1 +/- 2.6e+0	-3.2e+2    -1.7e+2 +/- 5.3e+1
REFL_135_I	5.4e+2    1.8e+2 +/- 4.5e+0	4.7e+0    -6.7e+1 +/- 7.8e+1
REFL_135_Q	3.2e-1    -1.7e+0 +/- 1.8e+0	-2.3e+1    2.2e+2 +/- 4.2e+1

黒字がモデル、赤字が測定値(10%の較正誤差含まず)

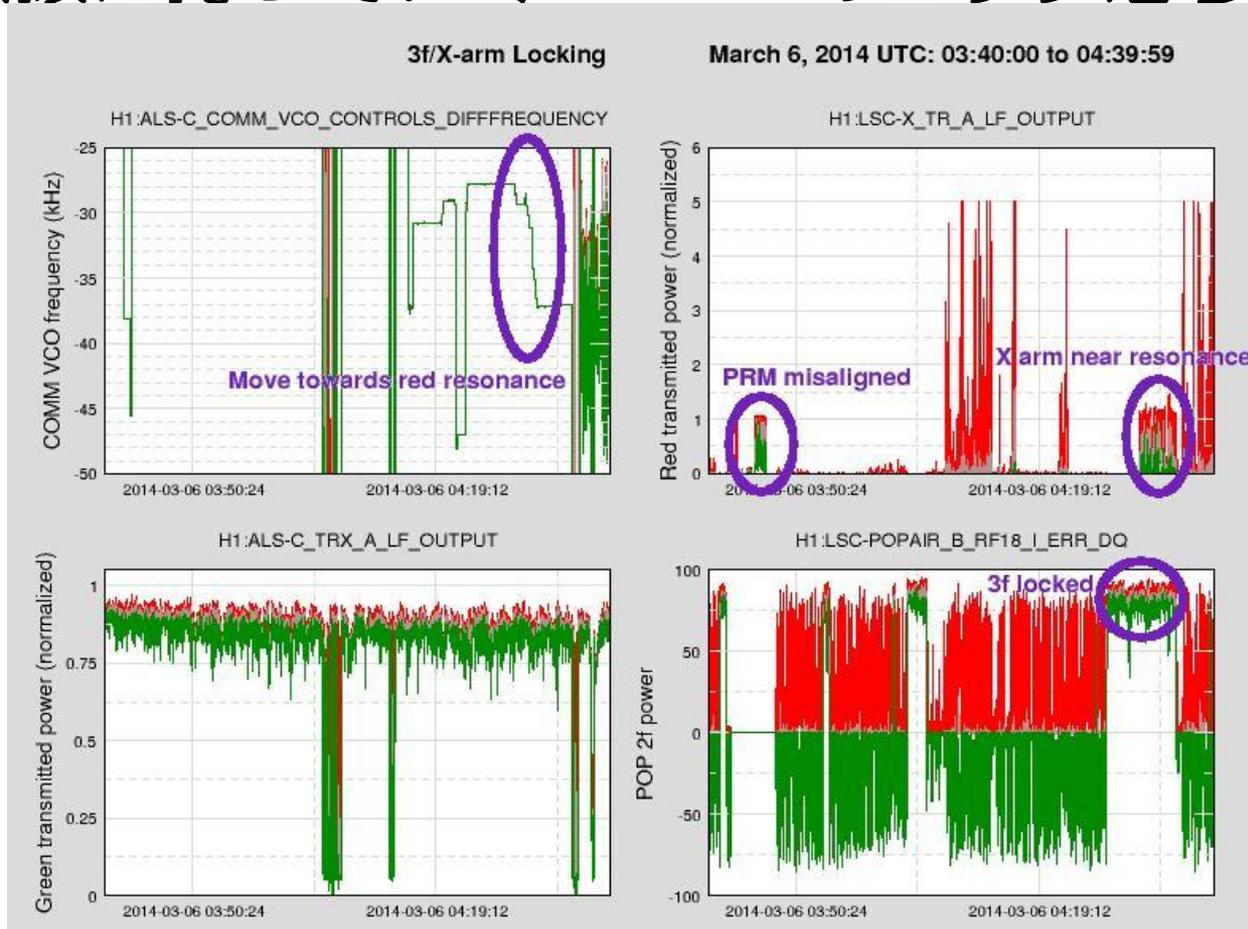
# 3f locking

- PRMIは普通はキャリアとサイドバンドのビートを使ってエラー信号を取る(1f locking)
- これだと、腕がキャリア共振する時にロックを保てない(腕の反射率が位相反転するため)
- そこでサイドバンドとその2次高調波のビートを使う (3f locking)



# 3f locking中の腕の掃引

- ALSでキャリアを腕の共振から少しずらす→PRMIを1fでロック→3fでロック→ALSでキャリアを腕の共振に持っていく→PRMIのロック落ちない！



# Simulink Noise Budget

# Simulink Noise Budgetとは

- Christopher Wipfが中心となって開発
- Simulink上でブロック図を書き、プログラムを走らせるとノイズバジェットを作ってくれる
- 「元々の外乱」を評価するためのセンサの場所や「元々の外乱」の場所を指定するためのSimulinkライブラリが用意されている
- GPS時間を指定するとEPICS channelの値やデータを自動的に取得
- Optickleによる干渉計の応答も入れられる
- KAGRAにも使える！
- [LIGO-G1400131](#)、[LIGO-G1300856](#)

# 例えばDRMIのモデル

input matrix  
(EPICS)

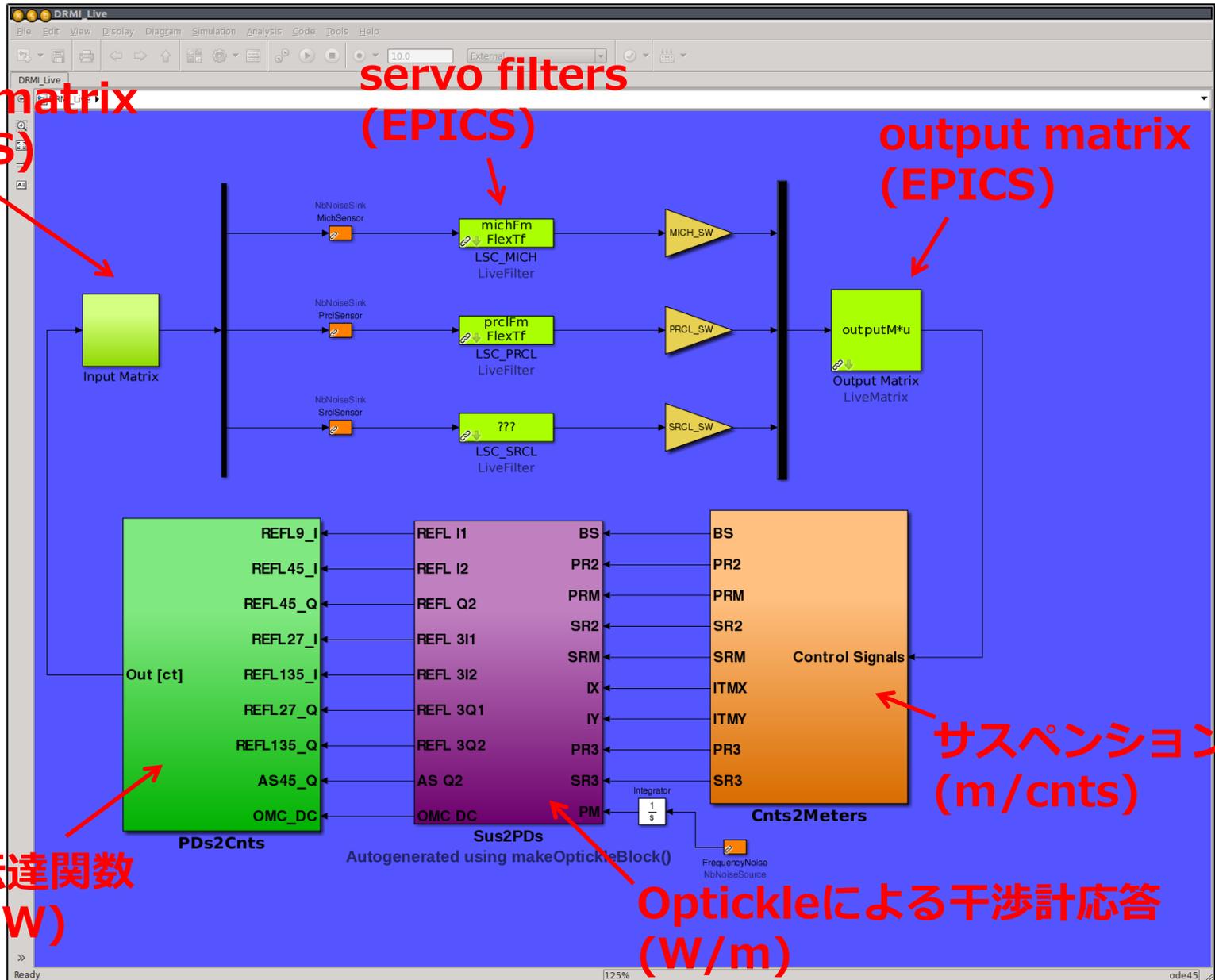
servo filters  
(EPICS)

output matrix  
(EPICS)

PDの伝達関数  
(cnts/W)

Optickleによる干渉計応答  
(W/m)

サスペンション応答  
(m/cnts)

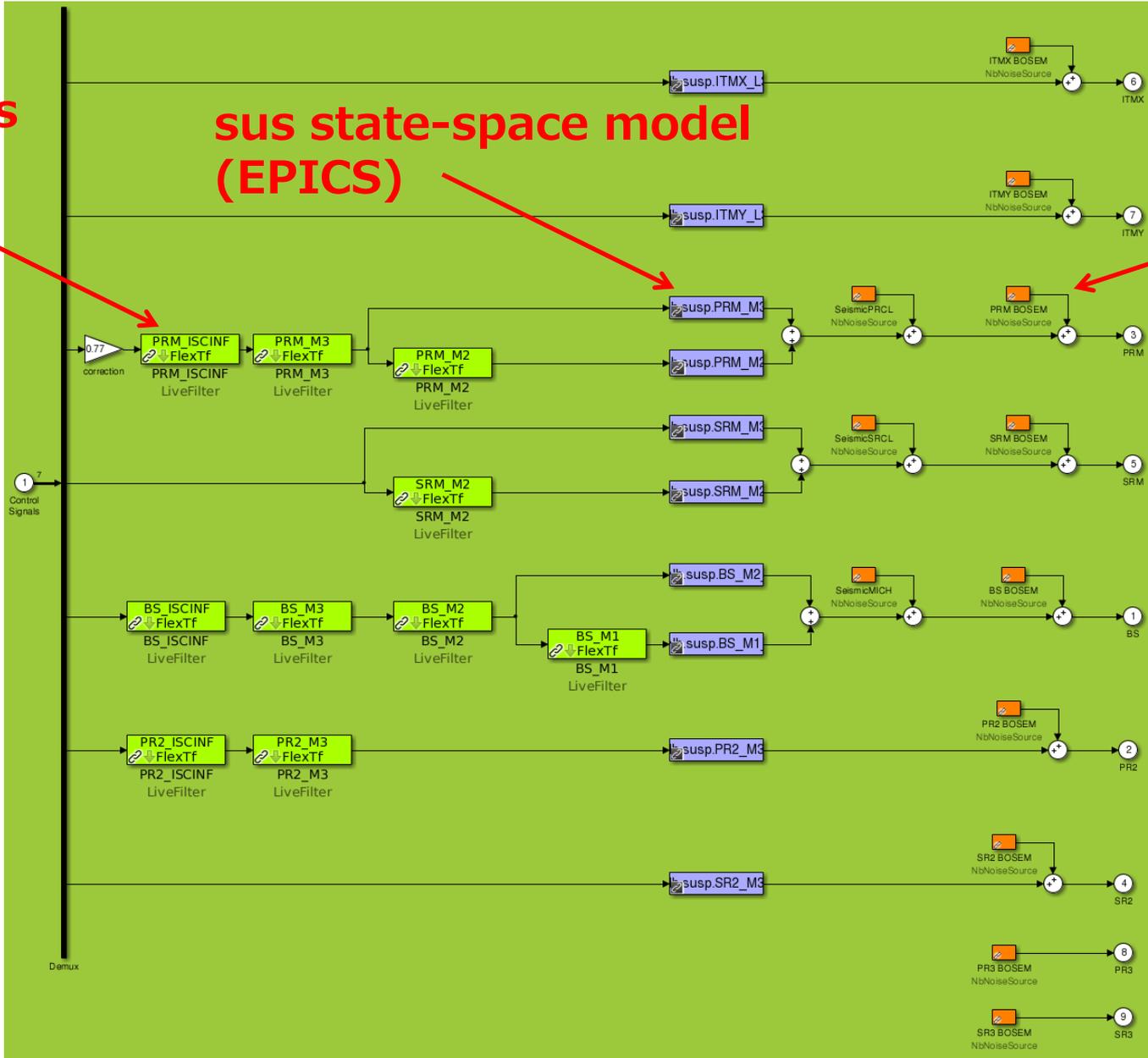


# サスペンションブロック

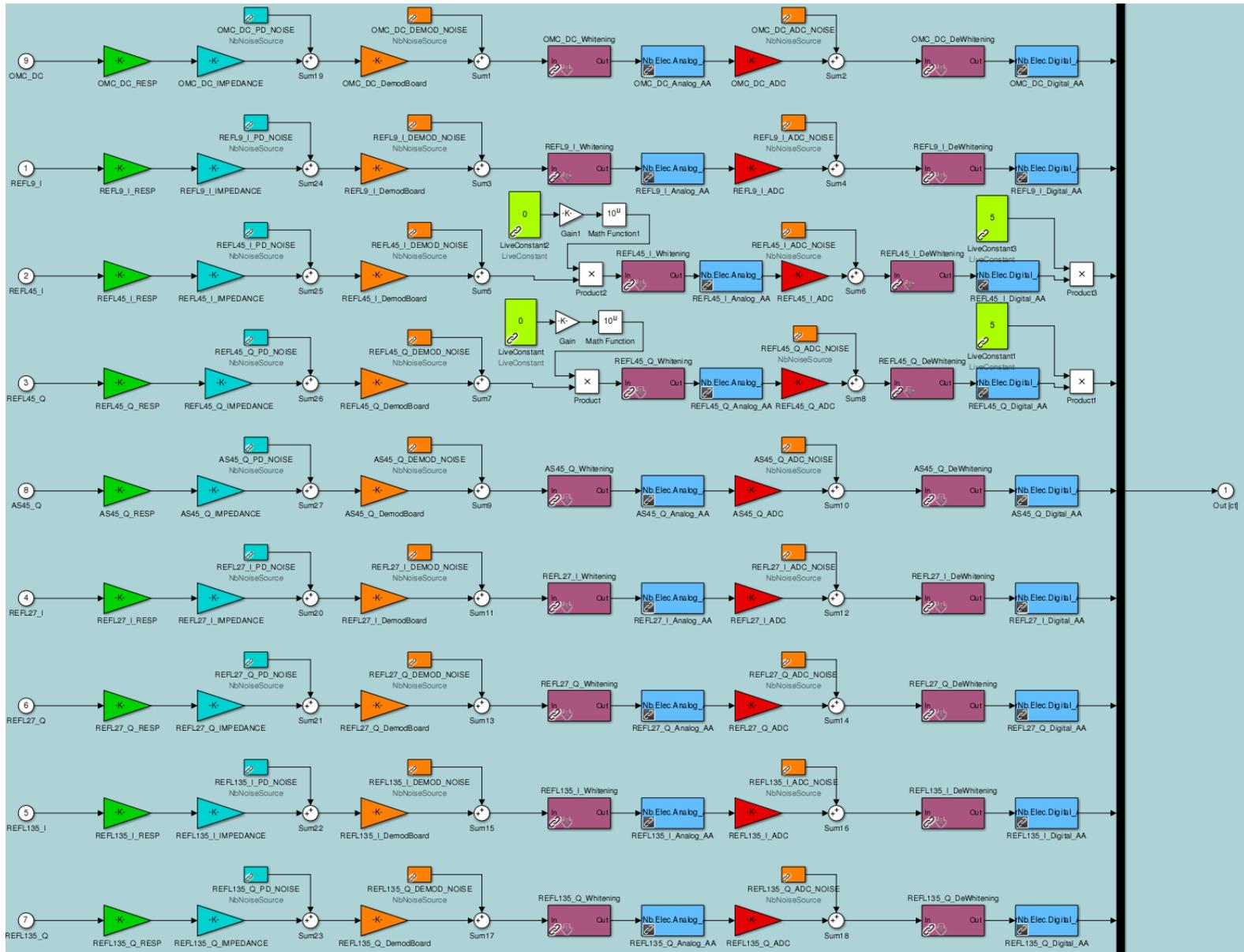
sus filters  
(EPICS)

sus state-space model  
(EPICS)

noise  
sources

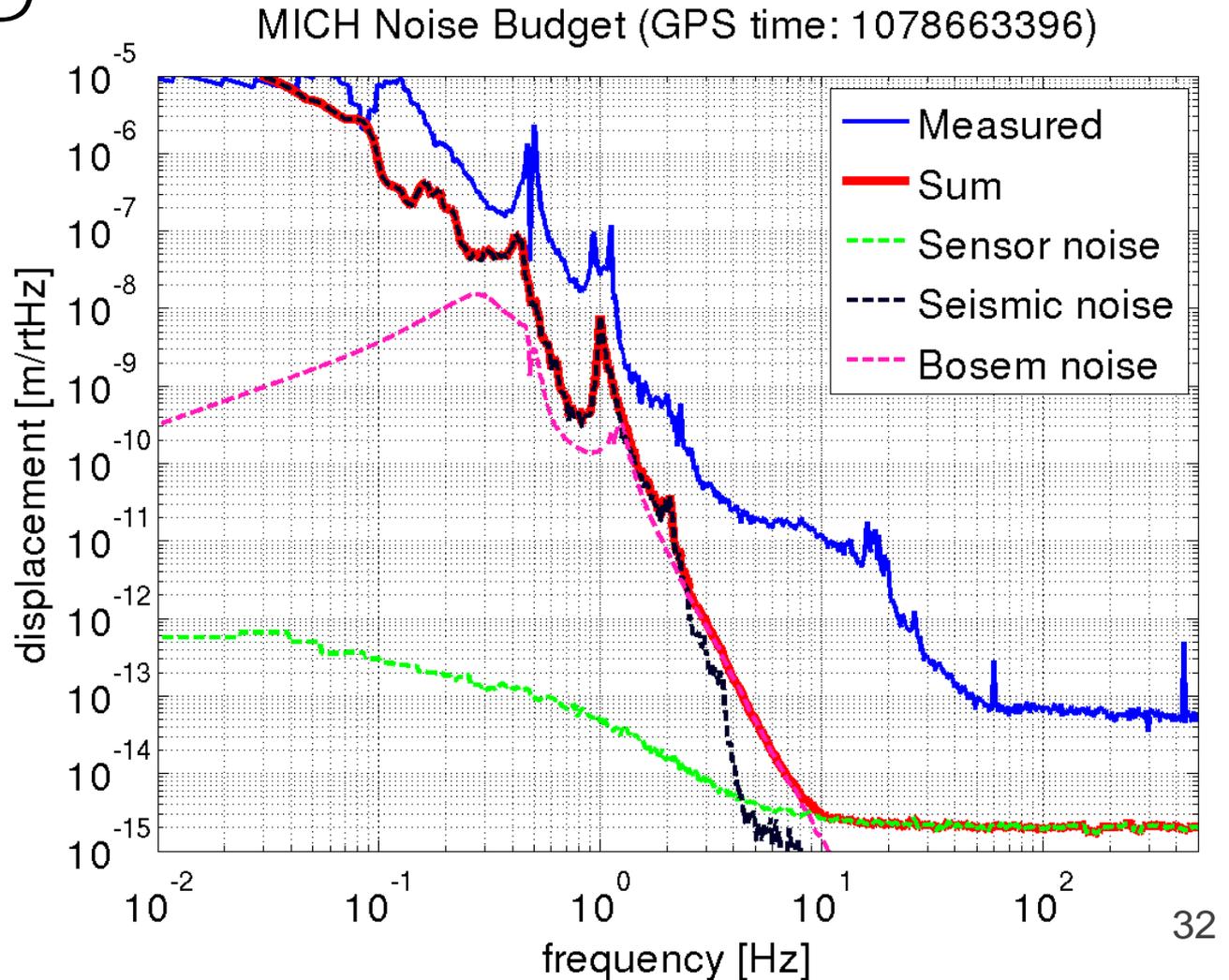


# PDブロック



# PRMIのノイズバジェット

- 種類ごとに分けてプロット
- 各まとまり  
それぞれの  
構成も  
別途  
プロット  
してくれ  
る



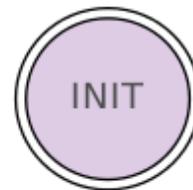
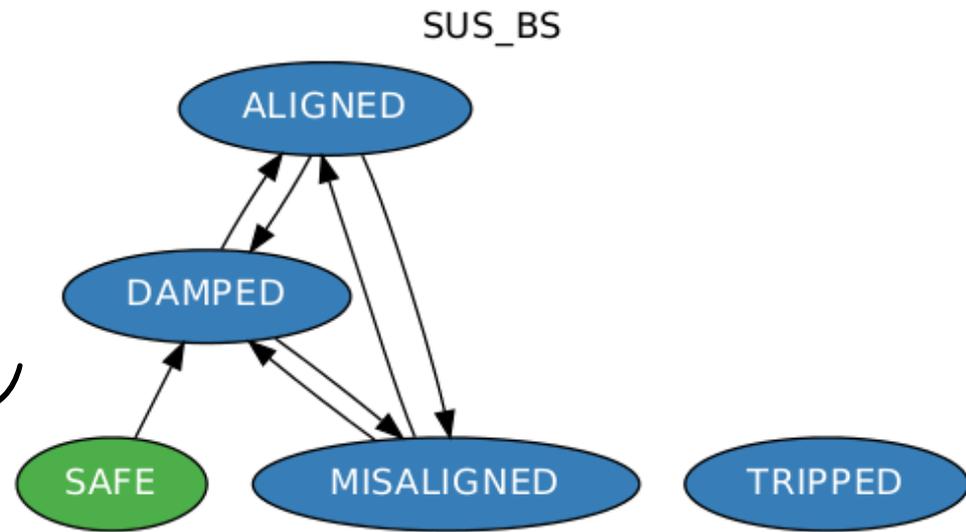
Guardian

# Guardianとは

- Jameson Graef Rollinsが中心となって開発
- 干渉計やサスペンションを有限オートマトンのように扱う
- 今の状態や、リクエストされた状態に従ってプログラムを走らせる
- かつてのauto-lockerなどに代わるもの
- Pythonで書かれている
- KAGRAにも使える！
- [LIGO-G1400016](#)

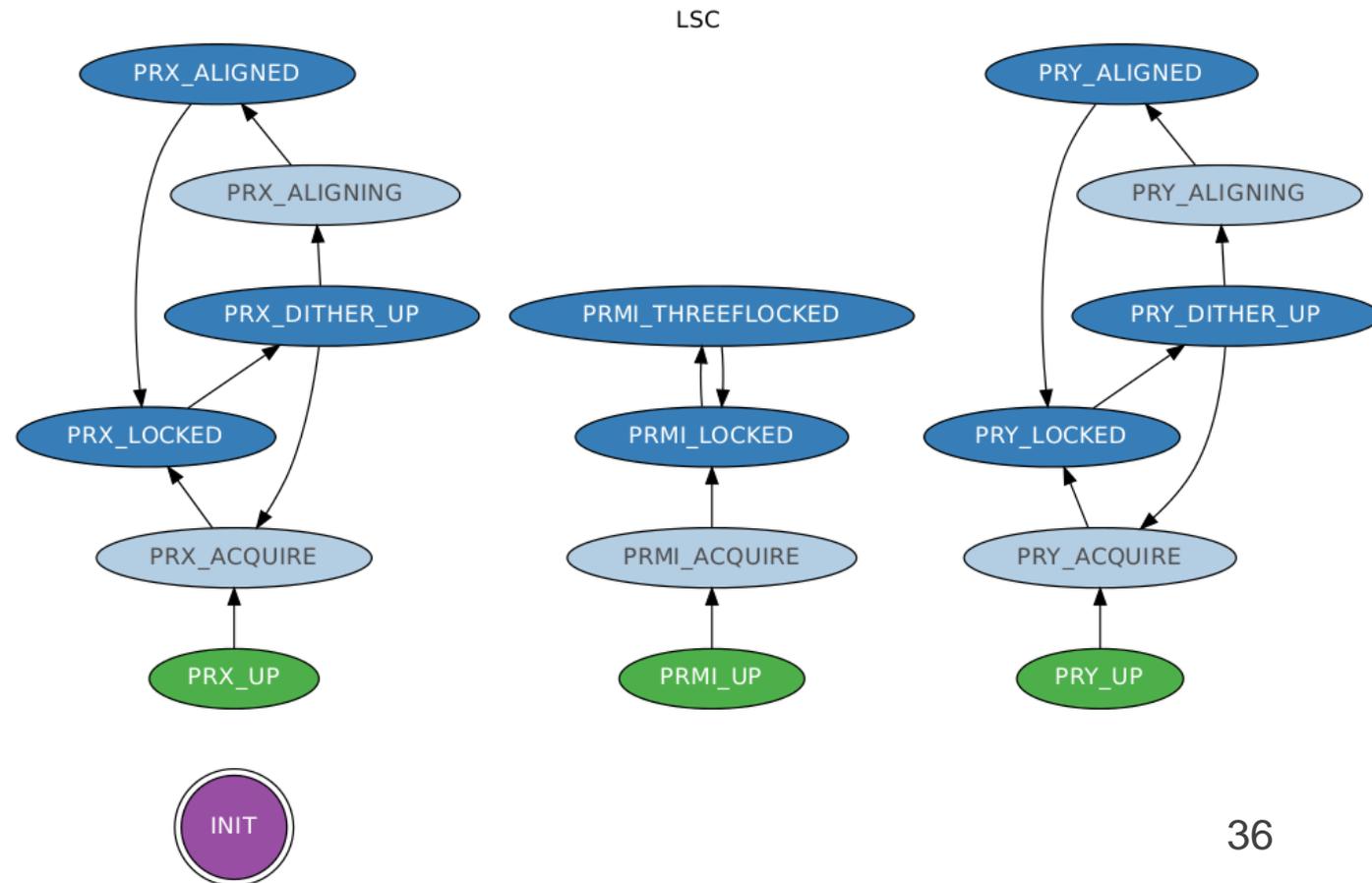
# 例えばBSのGuardian

- 「SAFE」安全な状態
- 「DAMPED」ダンピング制御がかかっている状態
- 「ALIGNED」アラインメントが取れている状態
- 「MISALIGNED」アラインメントをずらした状態
- 「TRIPPED」制御が切れた状態(何らかの異常で)



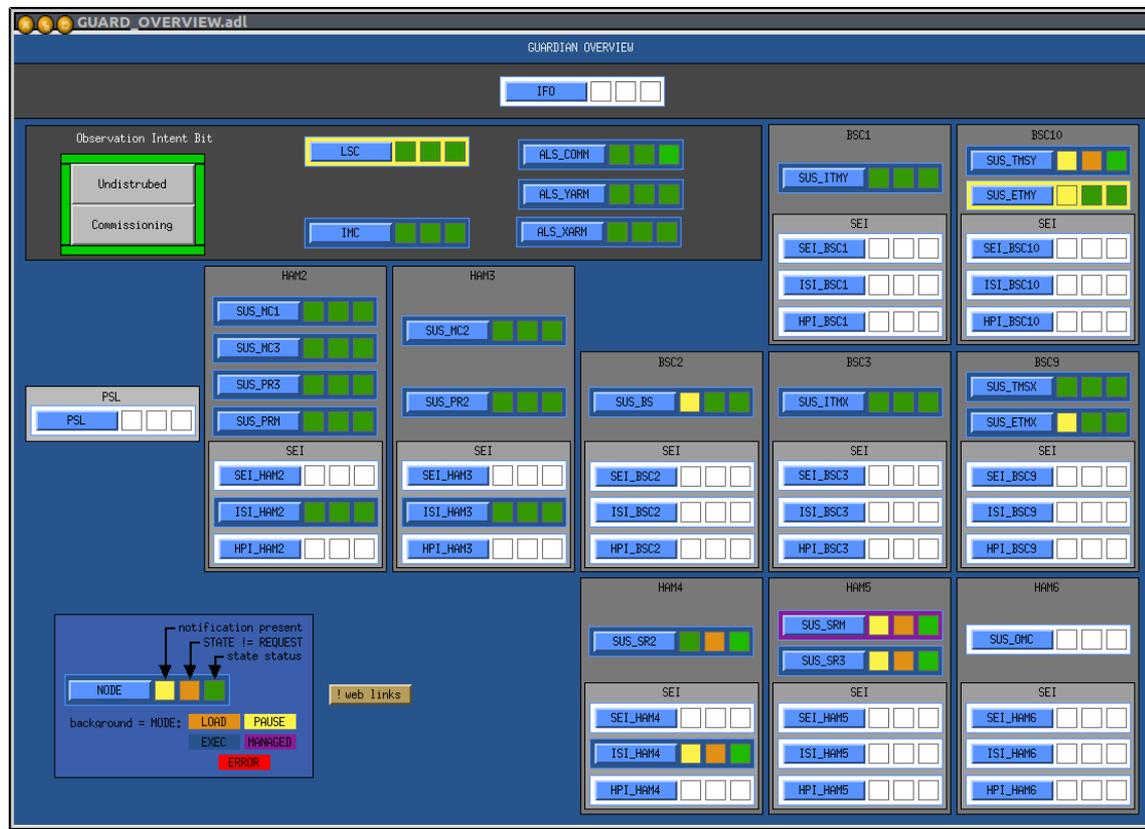
# 例えばLSCのGuardian

- 状態をリクエストすると、状態遷移図に従って状態を変化させていく
- 状態変化の基準は共振器内パワーなど



# Guardianのメリット

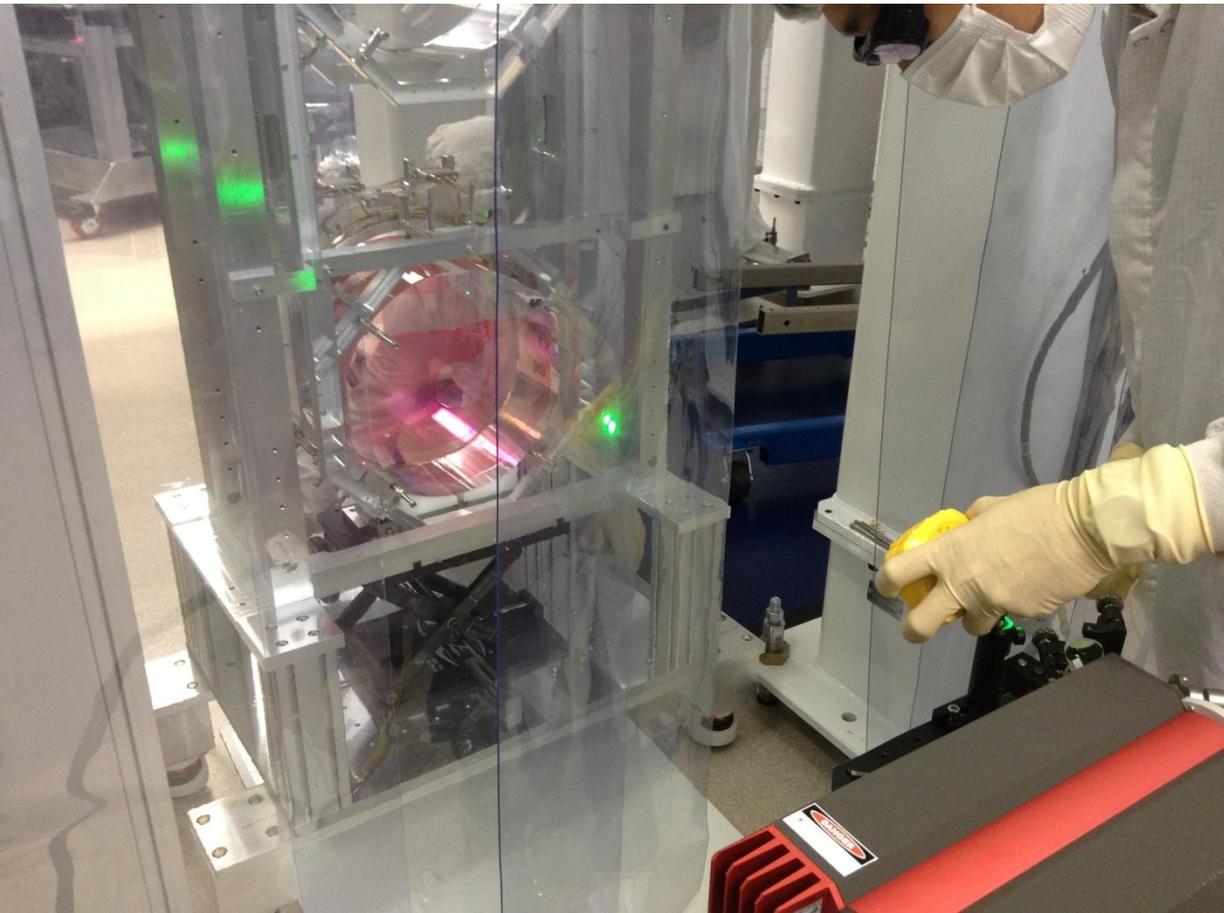
- いま干渉計やサスペンションが「状態」が一目でわかる
- たくさんのscript、 auto-lockerの一元化
- scriptを走らせる順番などをユーザー側が意識しなくてもよい



その他

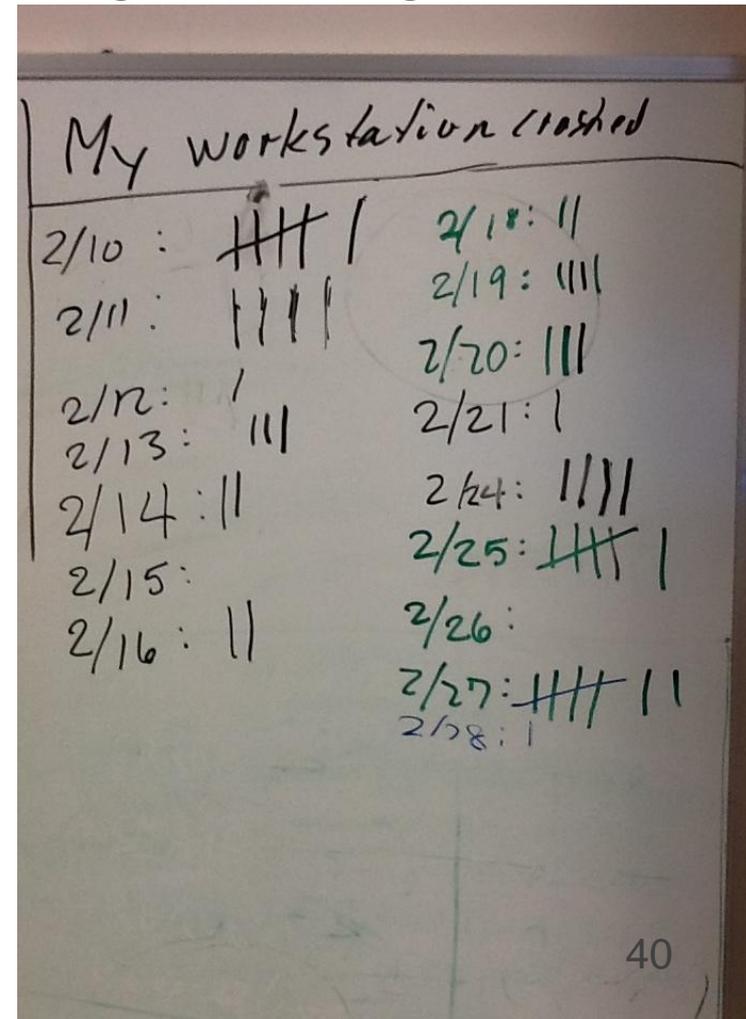
# その他やらせてもらえたこと

- ETMYの緑反射率/透過率測定
- TMSYのアラインメントの手伝い
- ALSX WFSのインストール etc.



# LHOでの1週間

- 毎朝8:15からintegration meeting (30人くらい)
- 月曜朝と木曜昼にcommissioning meeting (10人くらい)
- 水曜昼にsafety meeting (40人くらい)
- 金曜昼にISC meeting と simulation meeting (LLOなどと合同で)



# まとめ

- 干渉計コミッショニングは楽しい

# お世話になった人々(一部)

- Keita Kawabe
  - Kiwamu Izumi
  - Stefan Ballmer
  - Daniel Sigg
  - Sheila Dwyer
  - Alexa Staley
  - Jeff Kissel
  - Arnaud Pele
  - Koji Arai
  - Evan Hall
  - Jax Sanders
  - Lisa Barsotti
  - Paul Fulda
  - David Ottaway
  - Jamie G. Rollins
  - Hiro Yamamoto
  - Mike Landry
  - Fred Raab
  - Terry Gunter
  - John Worden
- ..... and more

A photograph of a burrito on a white plate. The burrito is wrapped in a light-colored tortilla and topped with a generous amount of green guacamole, melted white cheese, and a red salsa. The plate also contains several yellow corn tortilla chips. A white plastic fork and knife are placed on the plate behind the burrito. The plate is set on a dark, woven outdoor table. In the background, a clear plastic bag is partially visible.

**Winter 2014  
Commissioning Workshop**

# Commissioning Workshop

- Rana的ワークショップ
- 年2回開催
  - 2012年7月 散乱光、熱変形など (Cascina)  
報告書: [LIGO-T1200464](#)
  - 2013年1月 ASC、OMC、シミュレーション(LLO)  
報告書: [LIGO-T1300497](#)
  - 2013年6月 散乱光(GEO)  
報告書:

# 今回のワークショップ

- 2014年2月3-7日、Caltechで開催
- 21人くらいが参加(KAGRAからは中野さんと道村)
- 現代制御がテーマ([wiki](#))
- 講義的な発表と、班に分かれた実習



# タイムテーブル

## Winter 2014 Commissioning Workshop Agenda

	Monday, 3 Feb	Tuesday, 4 Feb	Wednesday, 5 Feb	Thursday, 6 Feb	Friday, 7 Feb
9:00	Gather, coffee	Gather, coffee	Gather, coffee	Gather, coffee	Small group work
	Plan for week	Optimal controllers: LQR, H-infty	Descriptions of problems to solve	Small group work	
10:00	Motivate state space				Build optimal controller for double pend
	Intro to State Space	Kalman optimal state estimators	Lunch	Lunch	
11:00	Build double pend state space model				Try Kalman Filters
12:00	Controller design with state space tools	Adaptive gain feed forward cancellation	Small group work	Small group work	
13:00	Lunch				LMS-based adaptive controls techniques
14:00	Build controller for double pend	Outing / Adventure	Group updates	Group updates	
15:00	Observer design with state space tools				Group updates
16:00	Build observer for double pend	Group updates	Group updates		
17:00				Group updates	Group updates
				Group Dinner	

# Group Works

- Generalized cost function  
任意の情報を組み込める評価関数
- Kalman filters, thermal states and state identification  
TCSのために鏡の曲率をKalman filterで推定
- Filter blending(中野くんが参加)  
複数のセンサ(geophone, LVDT)の最適な混合
- Hierarchical control(道村が参加)  
多段振り子のどの段にフィードバックするのが最適か(2段振り子、LQRを使用)
- Force-to-pitch filters  
数点だけを使ってF2P filter設計のための伝達関数を推定

# 詳細は

- そのうちDCCにアップロードされるWorkshop Reportを見て下さい
- あるいは現代制御を完璧に理解した中野くんか道村まで
- MATLAB Simulinkの例題もいくつも持ってます

INTERNATIONAL COMMISSIONING WORKSHOP

VIR-0238A-13

2014/03/30

Report from the Controls  
Commissioning Workshop at CIT -  
February 2014

Commissioning Team

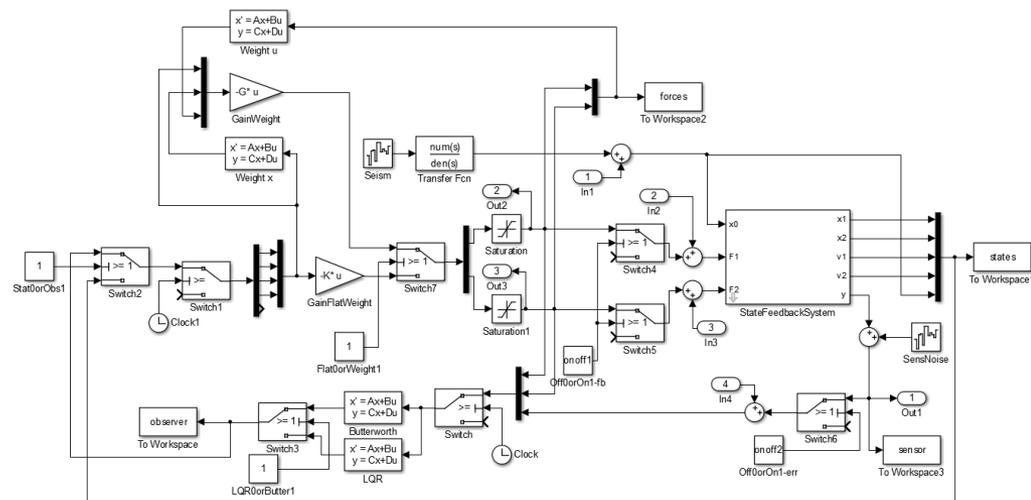
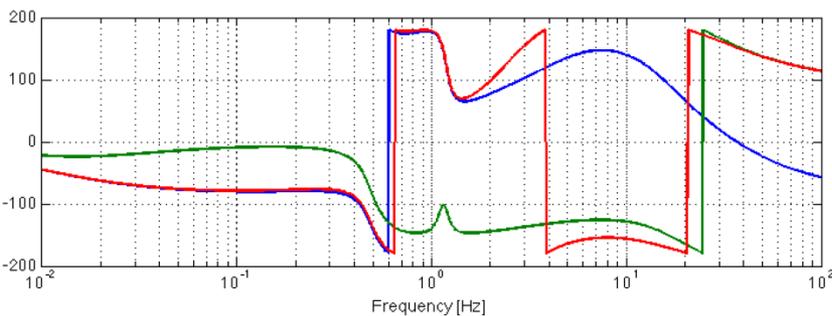
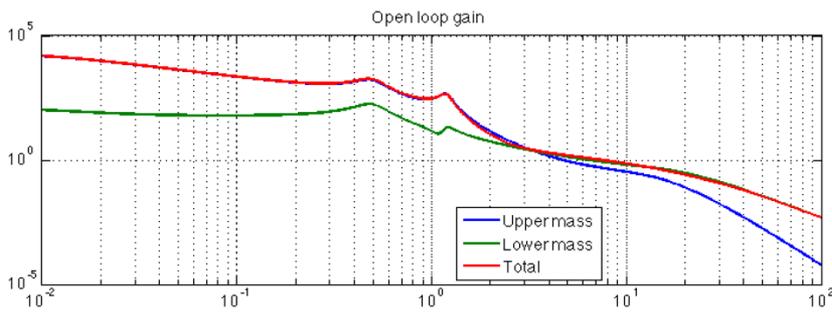
<http://www.ligo.org/>  
<http://www.ego-gv.it/>

# 現代制御に対する感想

- 自由度が多すぎると行列の計算が大変
- ロバスト性(位相余裕的な)を議論し始めるとややこしい( $H^\infty$ など)
- 古典制御ではフィルタの設計が大変だが、現代制御では評価関数の設計が必要(雑音、レンジをどう重み付けするか)
- 制御対象のことをよくわかっている必要がある(システム同定が必要)
- ただし、いずれも数学的に解決できるので、経験に頼った調整をしなくてすむ
  - 経験、人手不足のKAGRAにはうってつけ

# できるようになったこと

- 簡単な多入力多出力系のモデルが与えられた時、簡単な評価関数に基づいた制御
  - 自由度が多すぎるとだめ
  - 評価関数はアクチュエータのレンジ、鏡の残留揺れなど単純なもの
  - 位相余裕は自由にはつけられない



2重振り子での適用例  
(オープンループ伝達関数)

おわり