

Caltech 40mに行ってきました ～2012夏～

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



概要

- 渡航先: Caltech 40m Lab
- 期間: 2012年5月21日-7月13日
- 目的:
40m干渉計のフルロック
- 費用負担先:
東京大学 物理学専攻
平成24年度 組織的な若手研究者海外派遣プログラム
(GWADW2012との合わせ技で)
LIGO Guest
- 宿泊場所: Caltech Housing
一軒家に3人

目次

1. 40mの現状
2. やったこと
3. その他
4. まとめ

1. 40mの現状

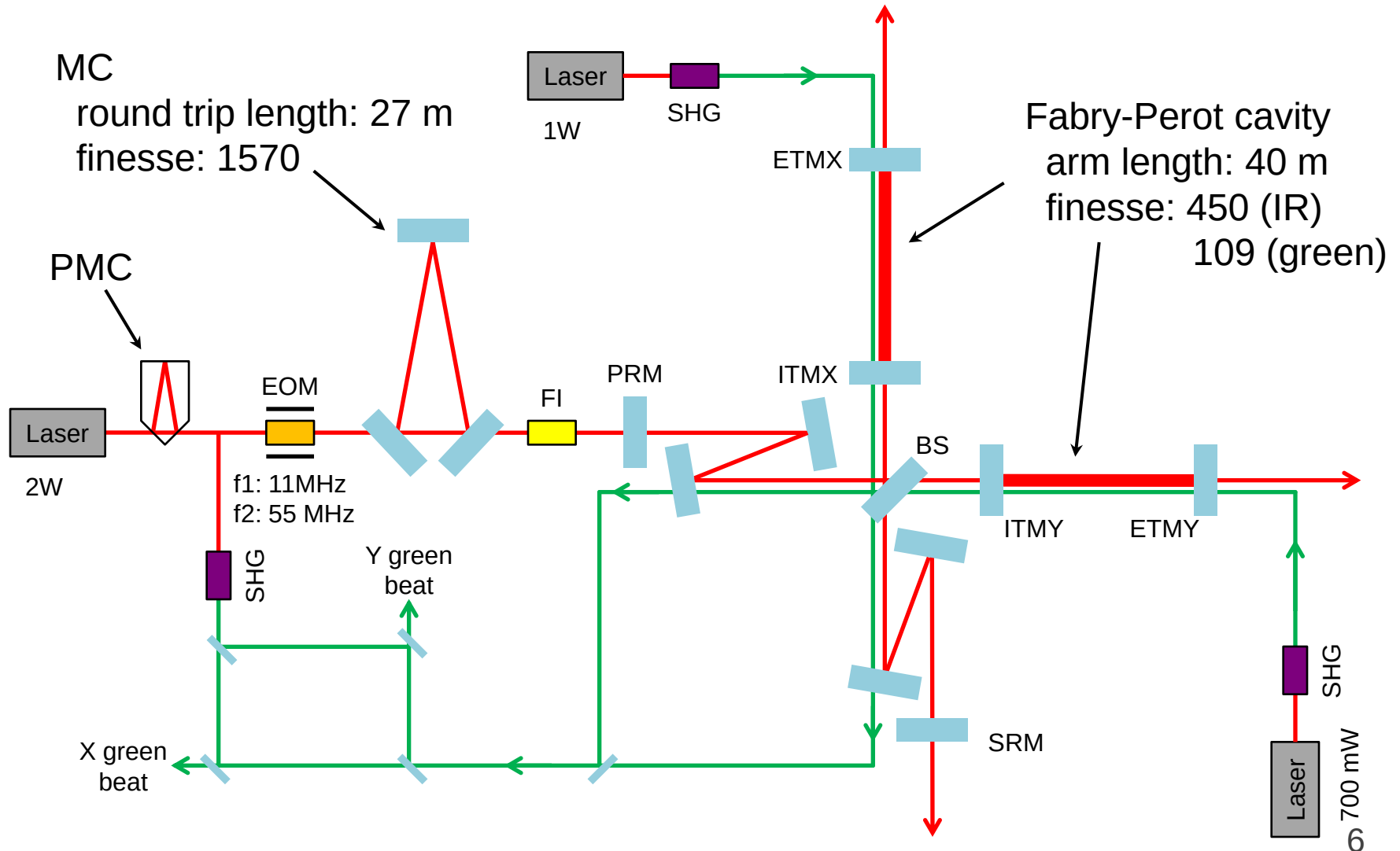
40mとは

- aLIGO(やその先)を加速させるためのいろいろなテスト/開発をするところ
- 40mの干渉計がある



40mの干渉計構成

- aLIGOやKAGRAとだいたい同じ



40mの現状(2012年5月時点)

- 目標: 干渉計をフルロックし、aLIGOに役立てる
フルロック = DRFPMIの長さ制御
- 和泉さんが4月末に日本に帰り、基本的に干渉計の進展は止まっていた
- 様々な課題があり、干渉計のフルロックができていない状態

フルロックへ向けての課題

- PRMIはロックできるが、power recycling gainが予想より低いし、ロックが不安定
mode matchingがおかしい？
PRC内？ 入射光の問題？
- DRMIもerror signalにglitchがあり、数分と持たない
原因不明
- 片腕ずつのgreen lockは実証したが、
両腕同時はやってない
greenからIRへどう移行するか未実証
- CDSが更新(workstationがUbuntuになったり)
和泉さん時代のscriptがいろいろ動かない等

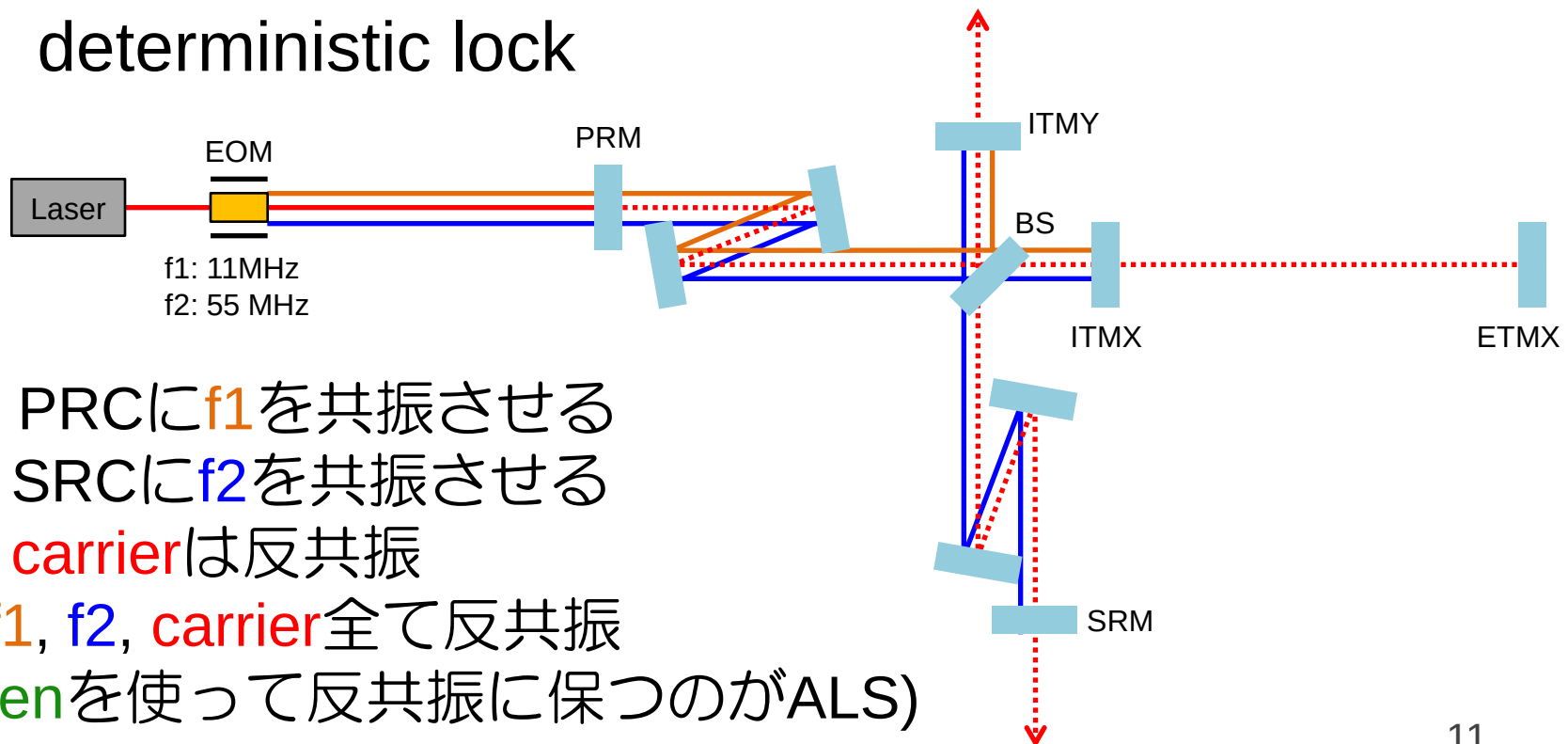
2. やったこと

やったこと

- green lockを両腕に導入
ALS = arm length stabilization
- “phase tracker” による新ALS
- ALSを利用したFPMIロックの試み
- ALSを利用したarm characterization
- PRC内調査のための大気導入
- PRMIの調査

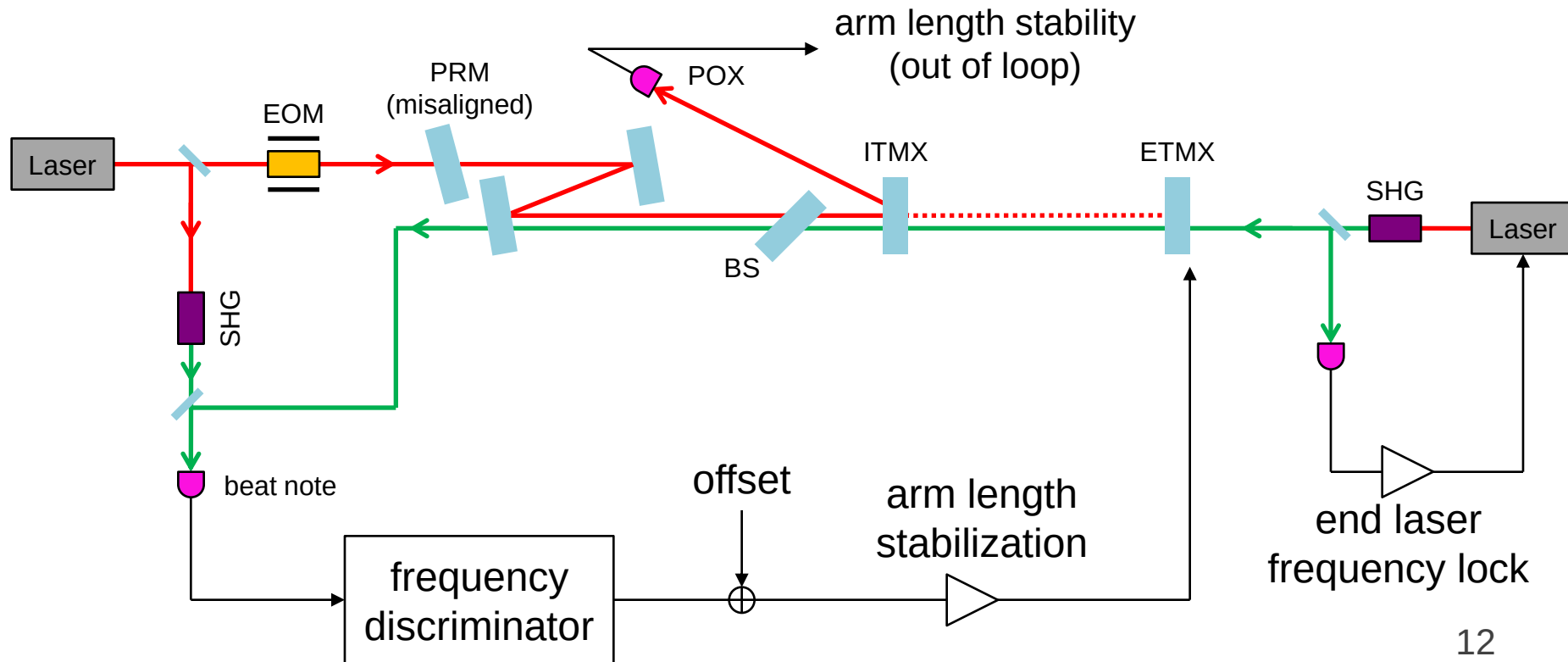
ALSの目的

- 共振器長が揺れると、腕の(複素)反射率が変わる
→ DRMIのロックを保てない
- 共振器長を予め安定化させ、確実にDRMIのロックを保つ。その上で、腕を共振に持って行く
deterministic lock



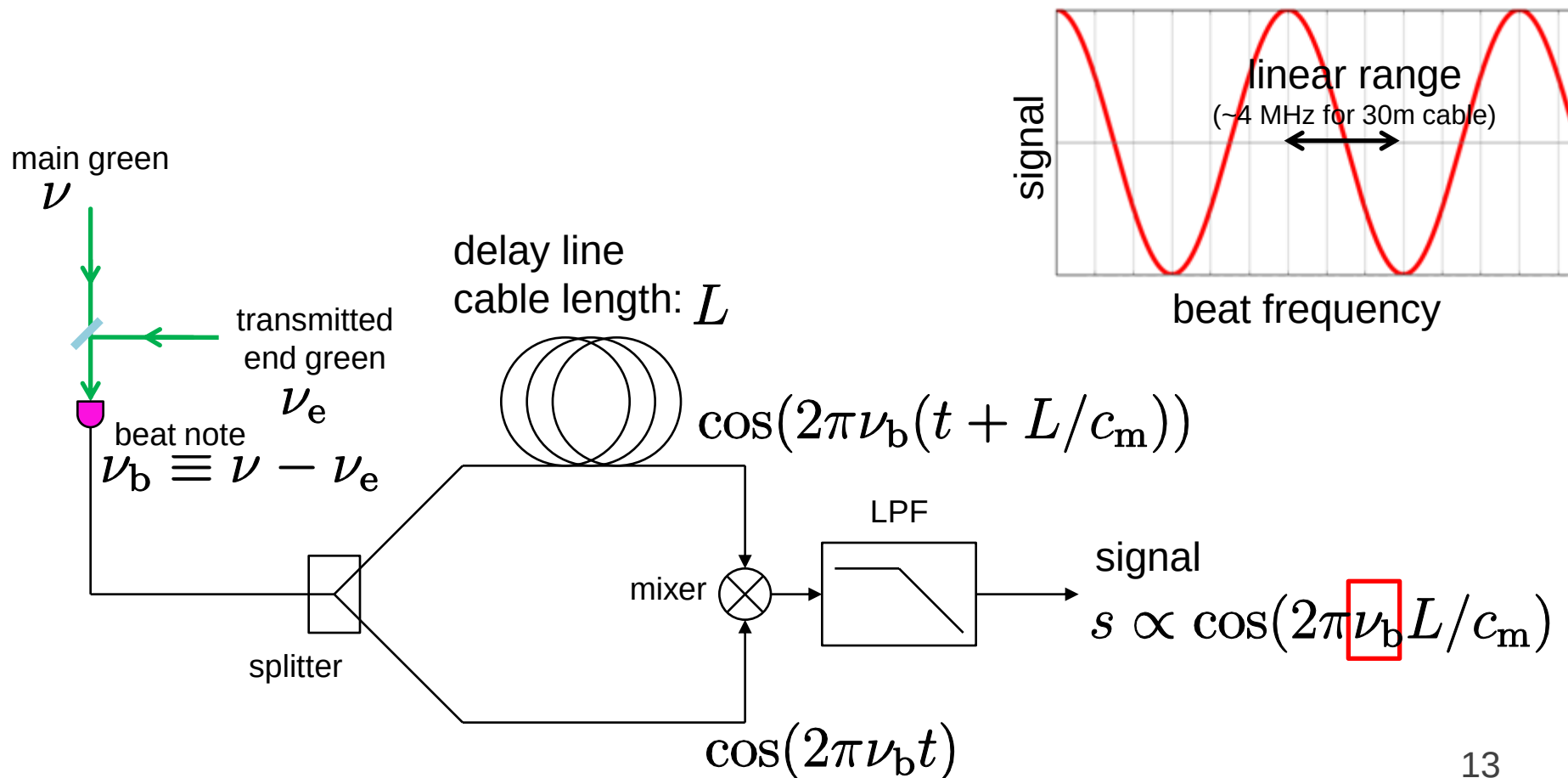
ALSのセットアップ

- ETM側から倍波(green)を入射し、end greenの周波数を共振器長に追従させる
- end greenとmainのgreenの周波数を比較し、共振器長を制御



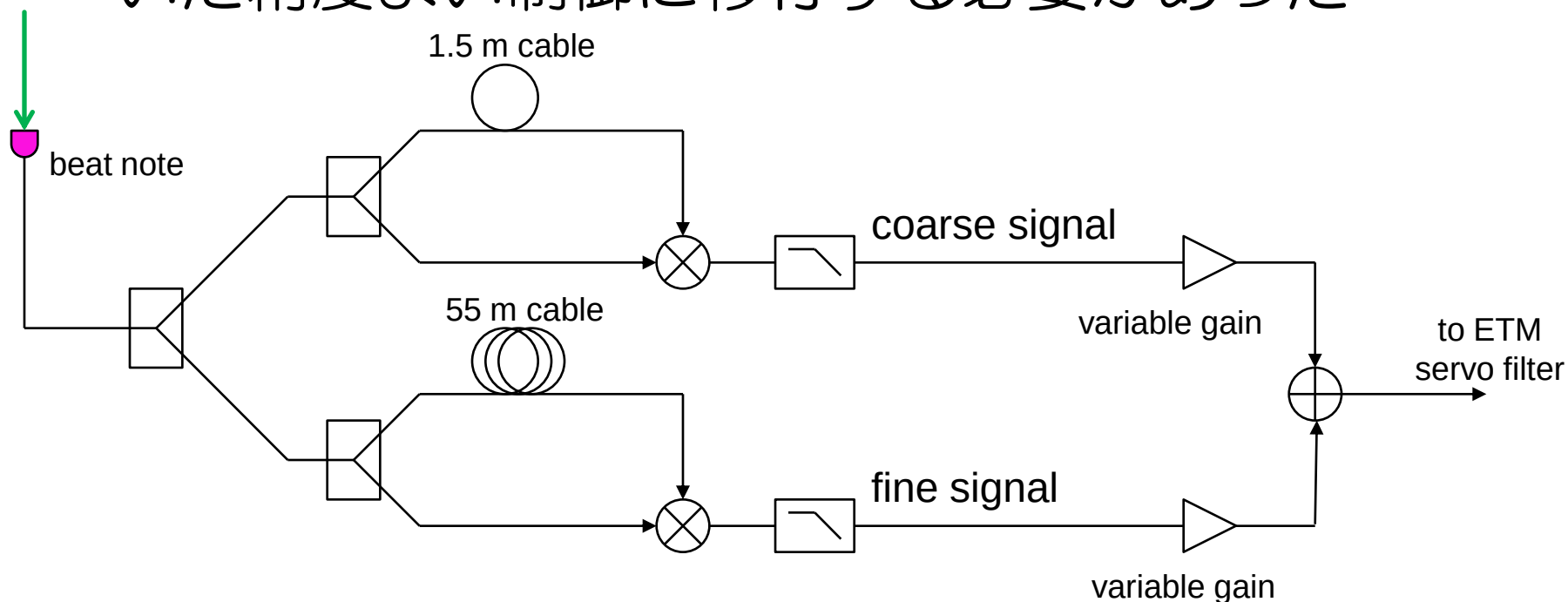
Frequency Discriminator

- delay lineを用いるDFD
- cableが長いほど、感度が良いが線形レンジが狭い



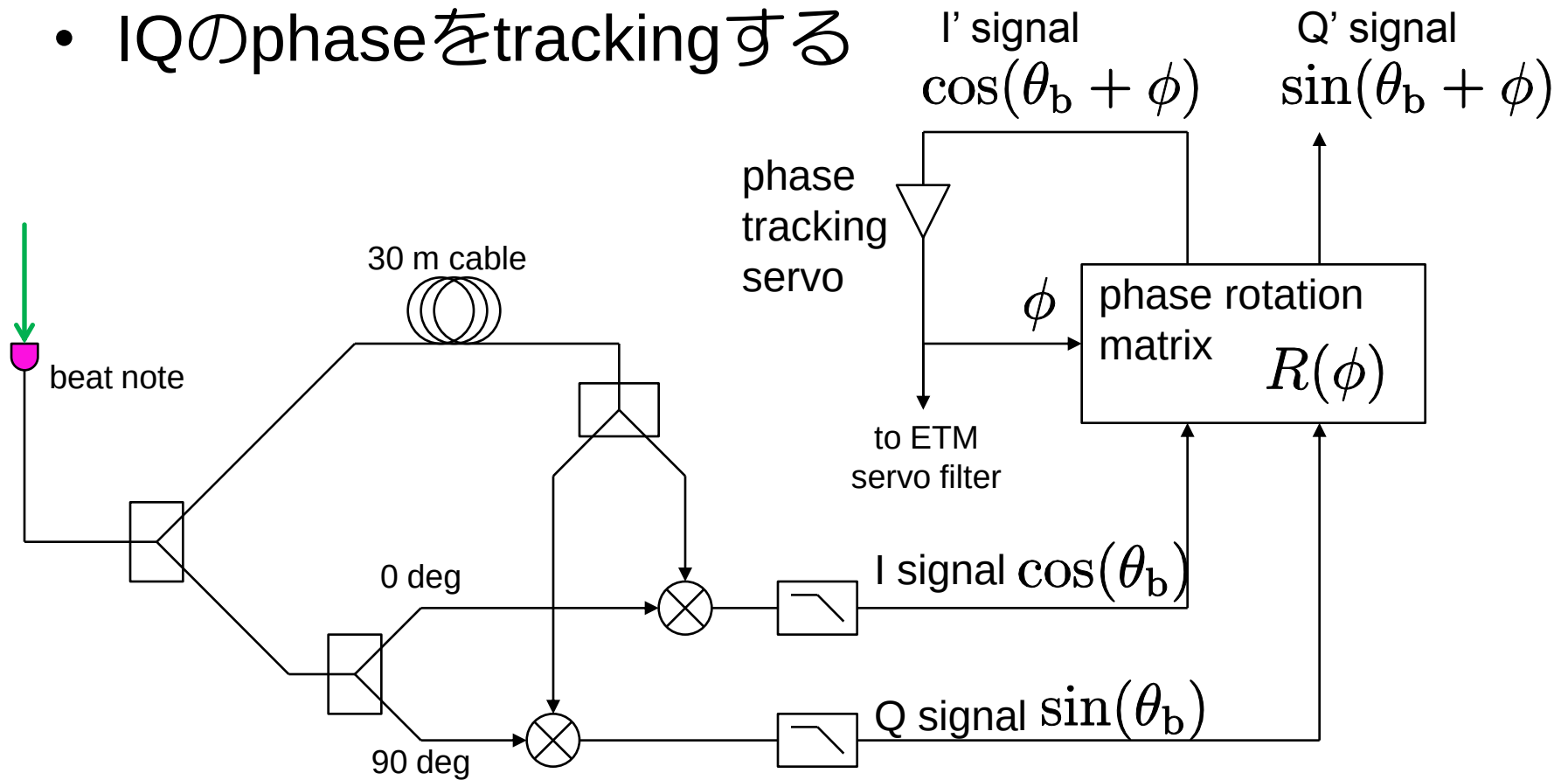
これまでのシステム

- 異なる長さのdelay cableからなるDFDを2つ用意
- まず線形レンジの広い(cableの短い)DFDを用いて制御し、線形レンジの狭い(cableの長い)DFDを用いた精度よい制御に移行する必要があった



新システム

- IQ phaseを用いる
- IQのphaseをtrackingする

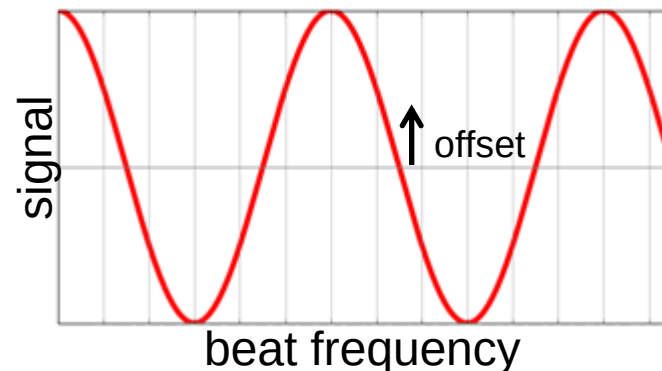


$$\theta_b \equiv 2\pi\nu_b L/c_m$$

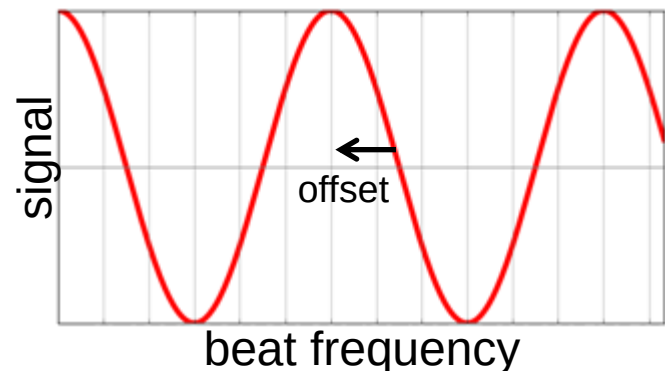
新システムの利点

- 感度がよく、かつ線形レンジが広い
線形レンジは理論上、無限大
- coarse/fineの切り替え不要
- phase tracking servoのループ内にオフセットを加えることで、任意の共振器長に持っていける
- 強度雑音に強い

これまで: 制御点をゼロ点からずらすことで、共振器長を変化させていた



これから: phaseをずらすので、制御点は常にゼロ点



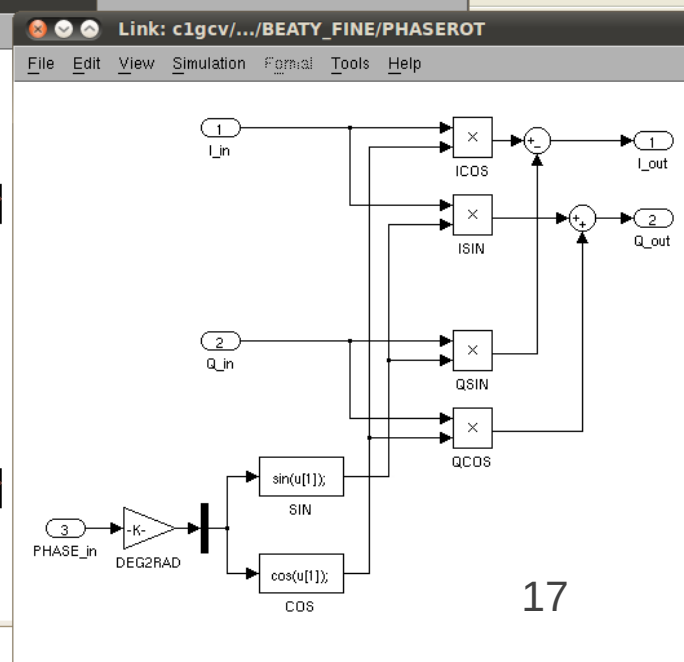
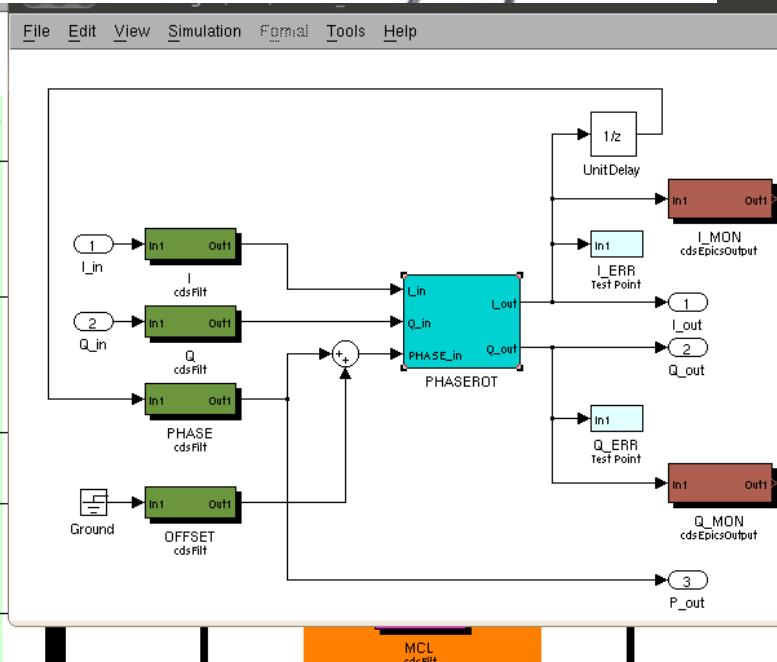
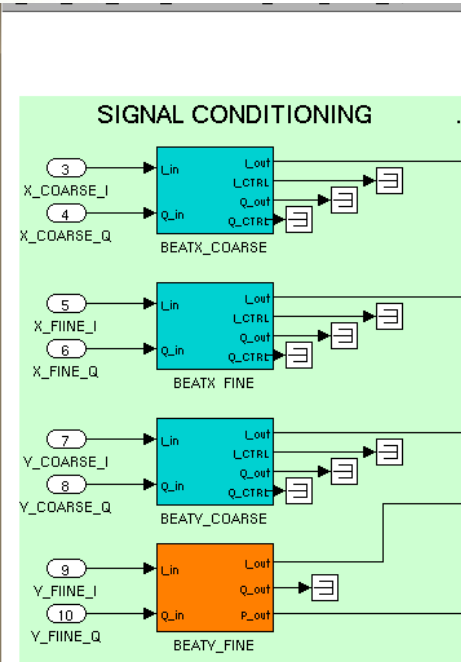
実装



(note that this is an older version of the beatbox)

きれいな
RF回路系

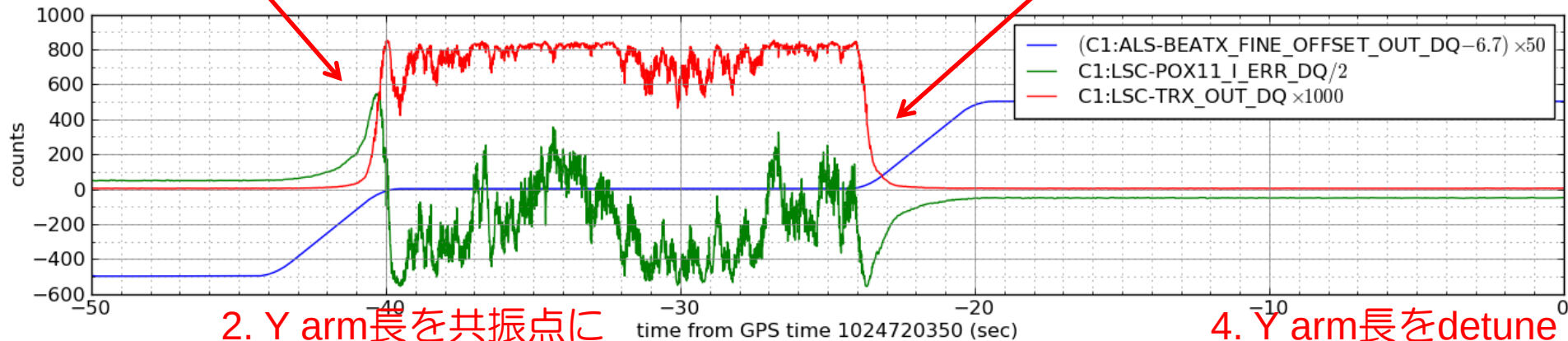
IQがあればなんでも
できるデジタル系



ALSの威力

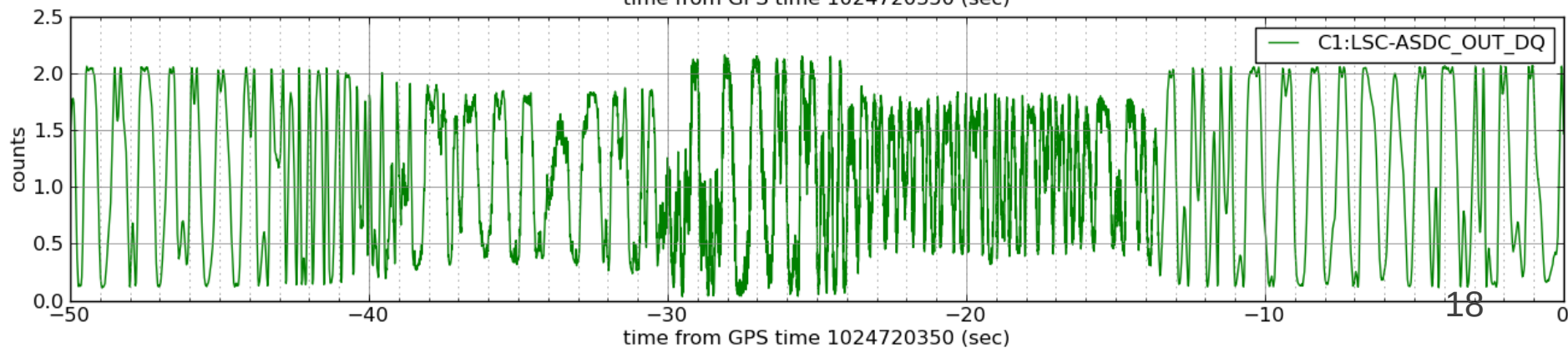
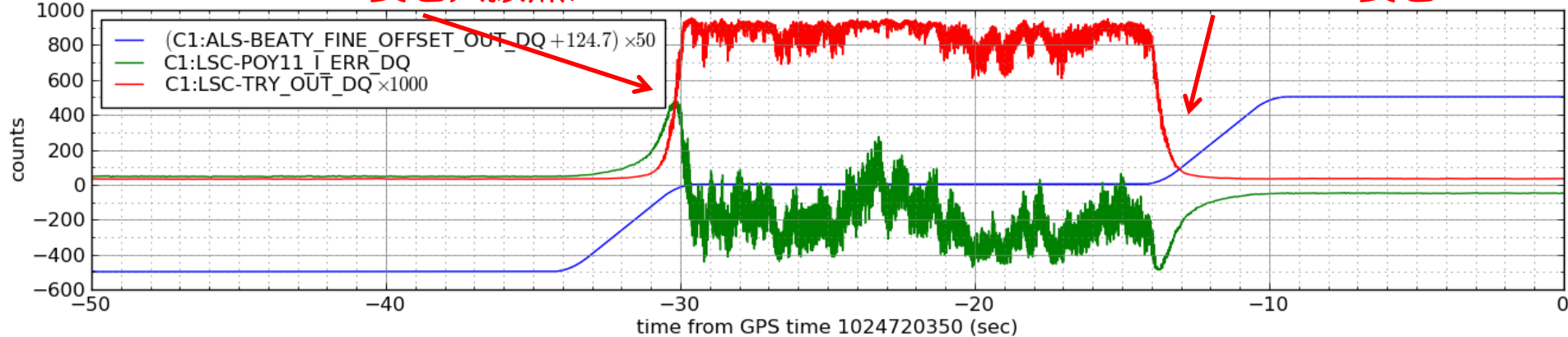
1. X arm長を共振点に

3. X arm長をdetune



2. Y arm長を共振点に

4. Y arm長をdetune



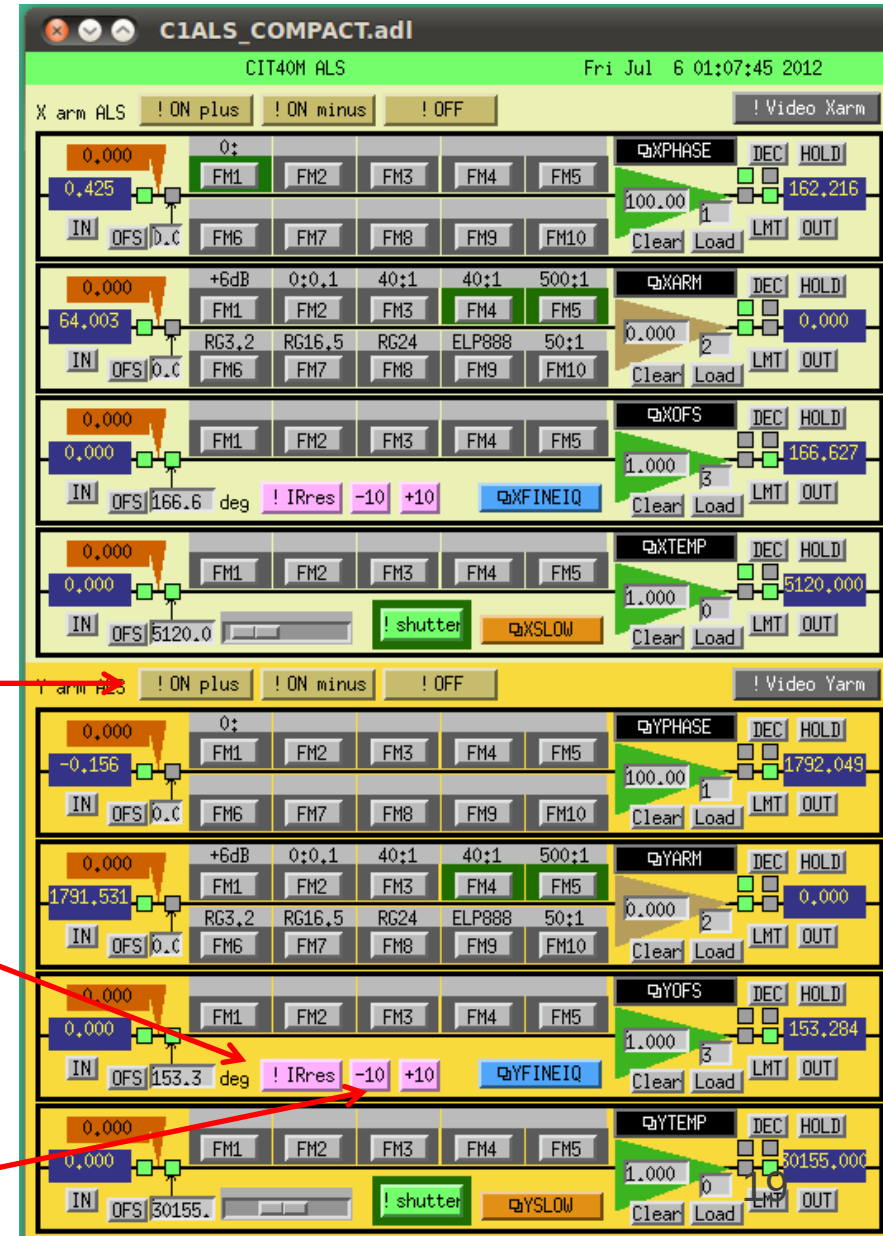
洗練されたALS

- 共振器長をsweepして、IRの共振を自動的に探すスクリプト
- IRの共振から何 MHz detuneさせるか自在に操れる

ALS on/offのボタン

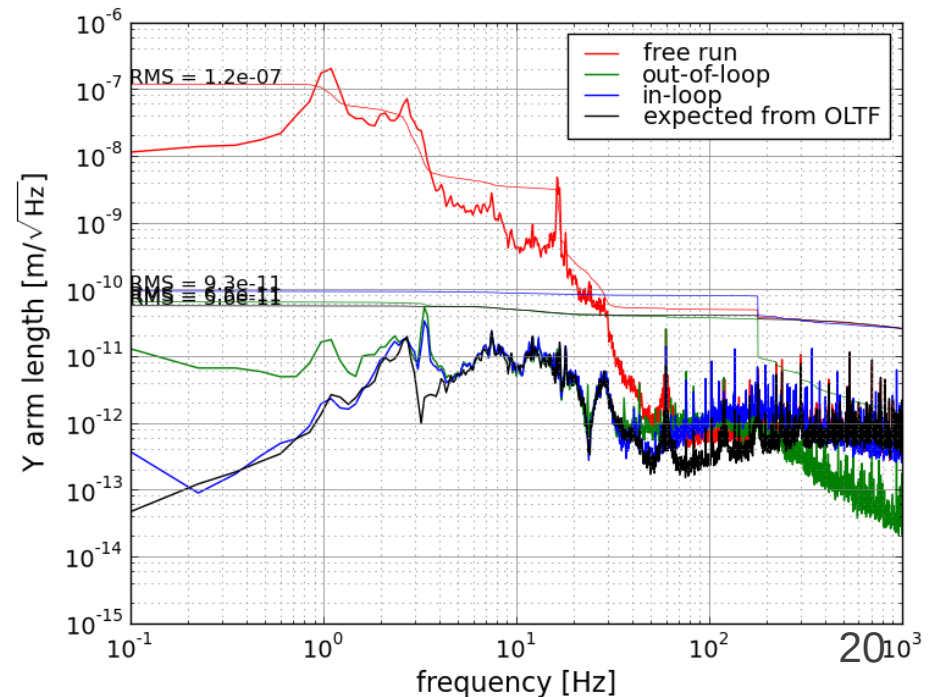
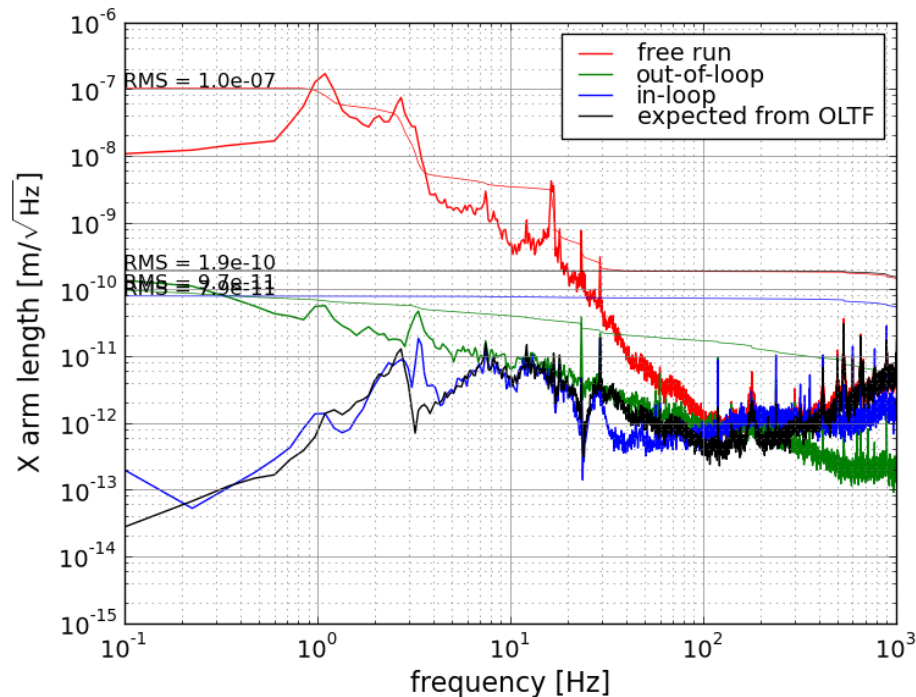
IR共振を探すボタン

0.1 MHz detuneさせるボタン



ALS後の共振器長安定度

- RMSでX armは97 pm, Y armは 65 pm程度
- 和泉さんの到達RMS 24 pm(Y arm)より~3-5倍大
雑音源特定これから
end laserの周波数安定度？
- なんにせよ、両腕で1 nm(腕の線幅)より十分小さい

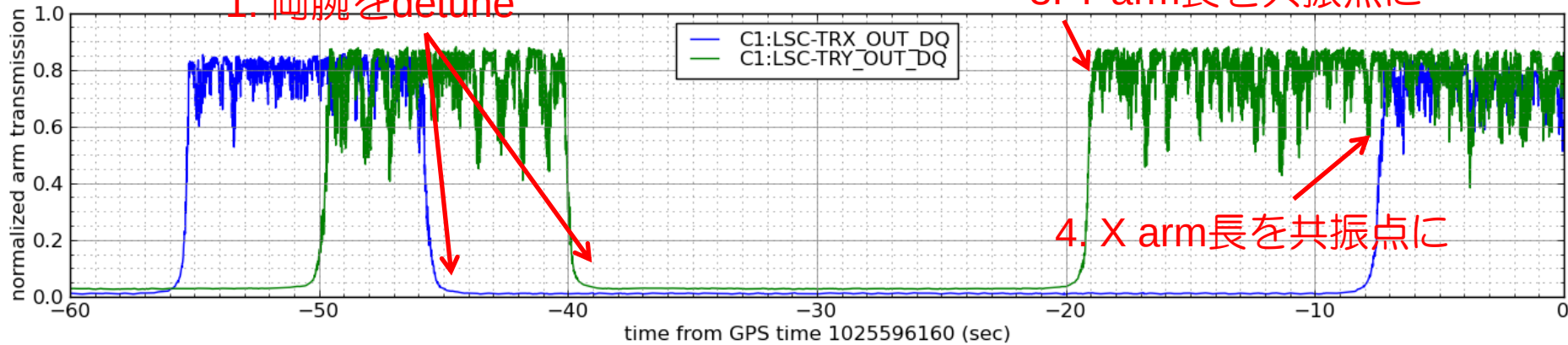


ALSを利用したFPMIのロック

- FPMIロックの通常の手順
 1. 片腕ずつPOX/POYでロック
 2. MIをASでロック
 - (3. POX/POYでの腕ロックからREFL/ASに移行)
 - ALSがあれば
 1. ALSで腕を反共振に保つ
 2. MIをASでロック
 3. 片腕ずつALSで共振器長をIRの共振に
 4. ALSからIRロックに移行
- ができるはず

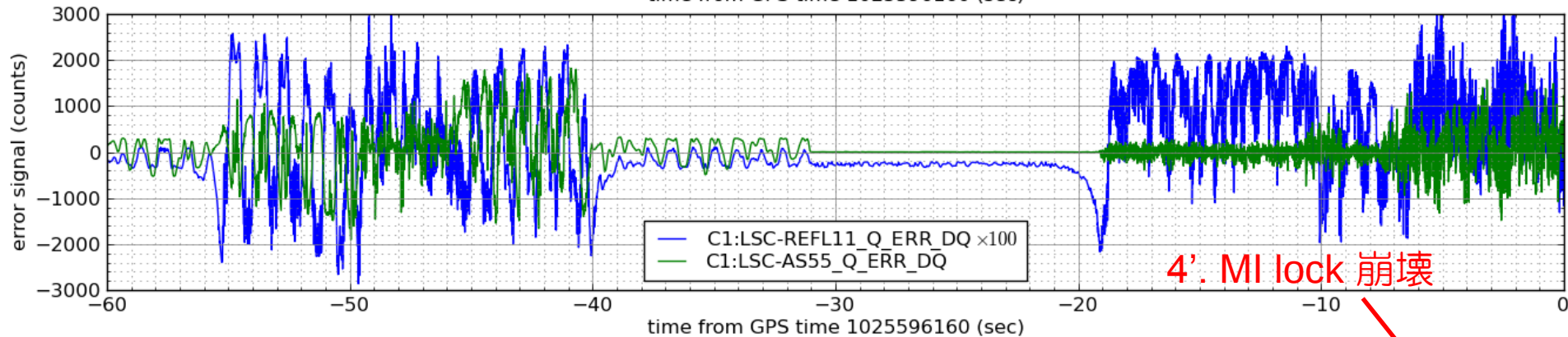
なぜかできなかった

1. 両腕をdetune



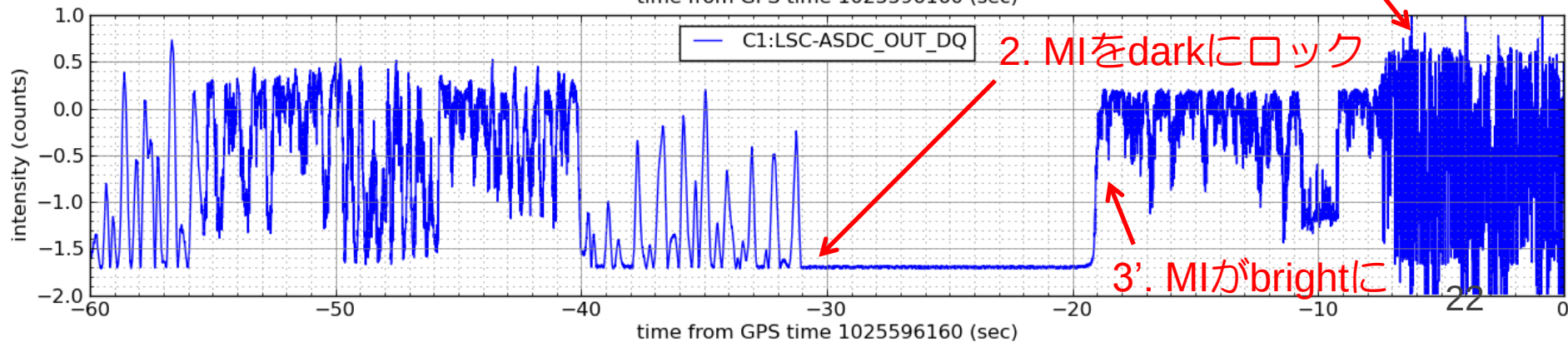
3. Y arm長を共振点に

4. X arm長を共振点に



4'. MI lock 崩壊

2. MIをdarkにロック



3'. MIがbrightに

ALSを利用したFPMIのロック

- なぜできなかったか不明
- MICHの揺れは~1 μm 、FP長の揺れは~100 pm
→ AS_Qに出てくるのは
MICH>>DARMになるはず
- 参考: 40m FPMIのlength sensing matrix

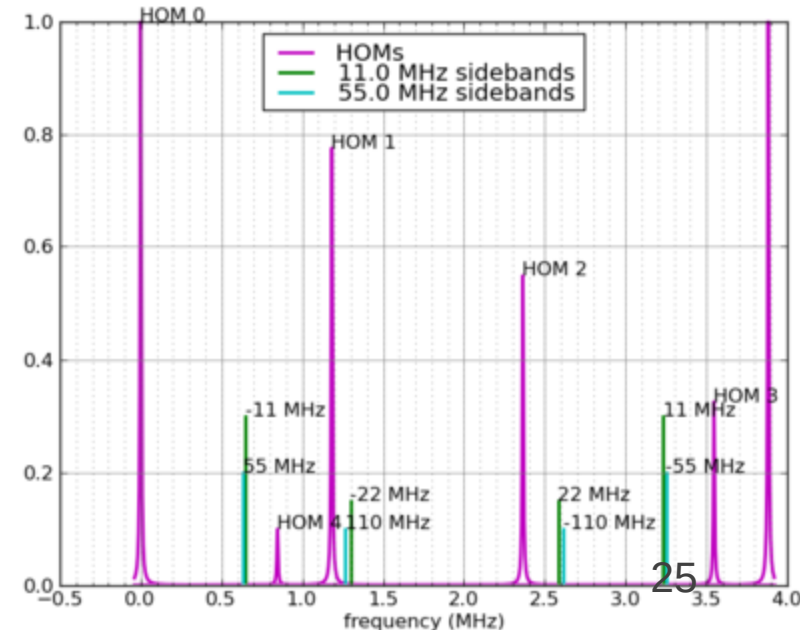
[W/m]	DARM	CARM	MICH
REFL_I	0	1.69e8	0
REFL_Q	7.09e1	0	-3.61e3
AS_I	0	0	0
AS_Q	1.04e6	0	3.61e3

ALSを利用したarm characterization

- phase tracking ALSを利用すると、共振器長を線形スキャンできる (mode scan)
 - 腕共振器の様々なパラメータがわかる
- PRMIがうまくロックできないのは
 - 入射光がおかしいのか
 - 腕共振器が悪いのか
 - PRC内の問題なのかわかってなかったなので、はっきりさせたい

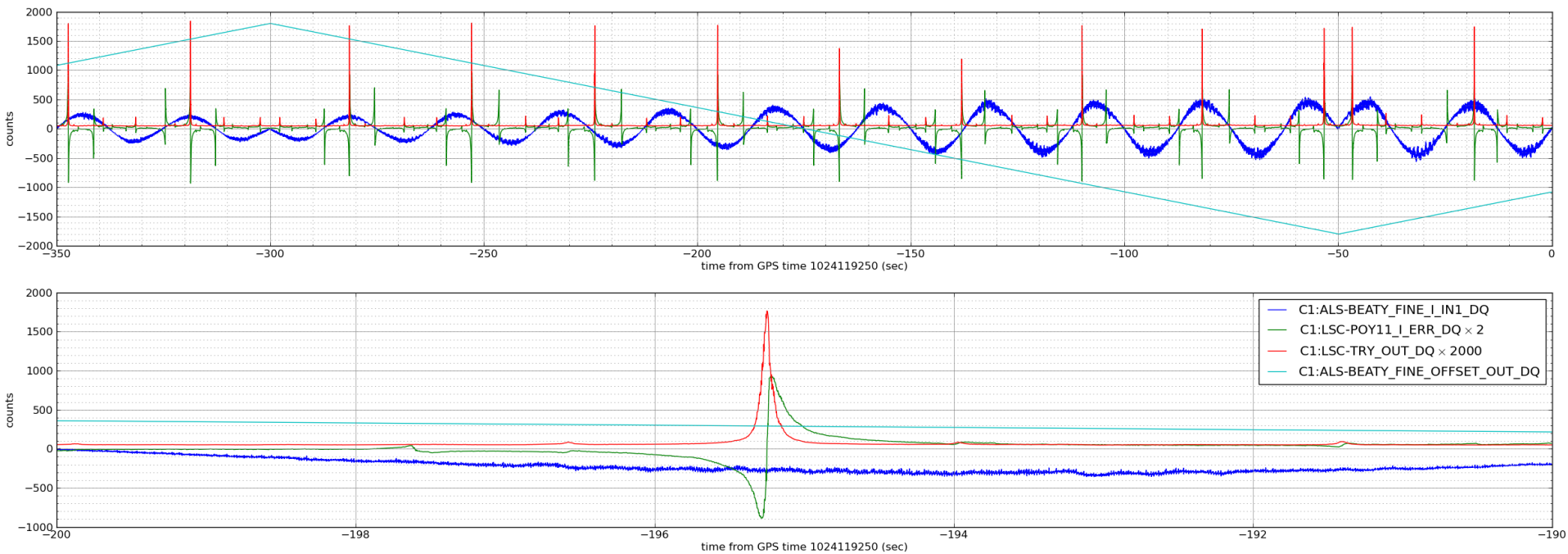
Mode Scanで何がわかるか

- mode matching ratio: TEM00と、高次モード(特に2次)の透過光量の比から
- FSR: TEM00間の周波数差(sideband周波数を利用して周波数をcalibrate)
- finesse: TEM00の線幅とFSRの比
- g-factor: 高次モード間隔から
- arm length: FSRから
- ETM RoC:
arm lengthとg-factorから
(ITMはflatなので)



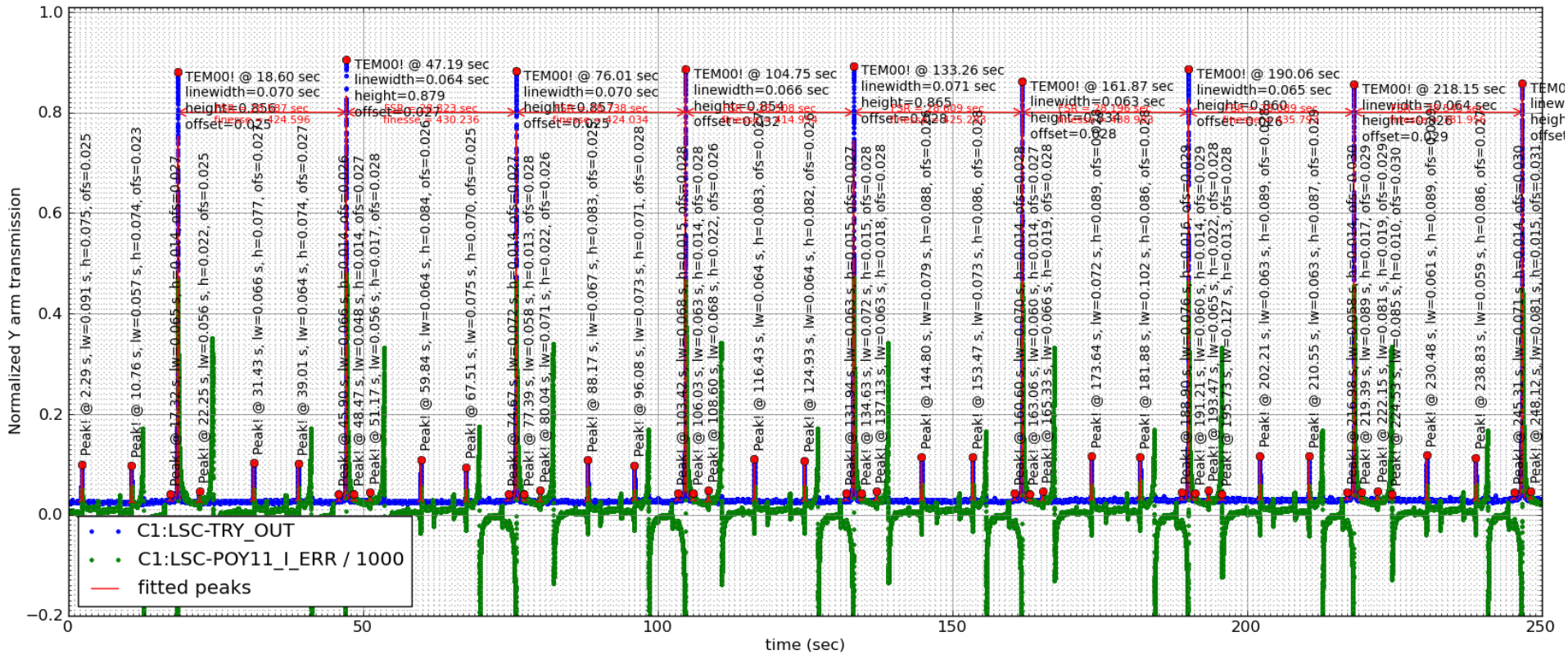
Mode Scanの生データ

- 8FSRにわたるscan



Mode Scanの生データ

- 各ピークを検出、Lorentzianフィット



Mode Scanの結果まとめ

- mode matchingは90%程度、腕のパラメータもまあ設計通り

PRMIの問題はPRC内にありそう

- 腕のlossがちょっと大きすぎるかも
finesseの設計値は450

反射率が設計通りだとすると、loss~1000 ppm

X arm

Mode matching MMR = 91.2 +/- 0.3 %
 (~2% of 01/10 mode)

FSR FSR = 3.97 +/- 0.03 MHz

finesse $F = 416 \pm 6$

g-factor $g_1 \cdot g_2 = 0.3737 \pm 0.002$

length $L = 37.6 \pm 0.3 \text{ m}$

ETM RoC $R2 = 60.0 \pm 0.5$ m

Y arm

Mode matching MMR = 86.7 +/- 0.3 %
 (~5% of 01/10 mode)

FSR FSR = 3.96 +/- 0.02 MHz

finesse $F = 421 \pm 6$

g-factor $g_1 \cdot g_2 = 0.3765 \pm 0.003$

length $L = 37.9 \pm 0.2 \text{ m}$

ETM RoC R2 = 60.7 +/- 0.3 m

ちなみに、ETM RoCの設計値は 57.37 ± 0.6 m

Coastline測定は57.6/57.1 m、ATF測定は60.26/59.48 m

PRMIロックの話

- 問題点

1. power recycling gainが低すぎる
設計値40に対し、測定値が最高でも15
(僕の測定では最高でも4.5)
2. mode matchingがおかしい
3. POP, REFL, ASのカメラ上でビームスポット
が揺れすぎ
4. 制御中のエラー信号がglitchy

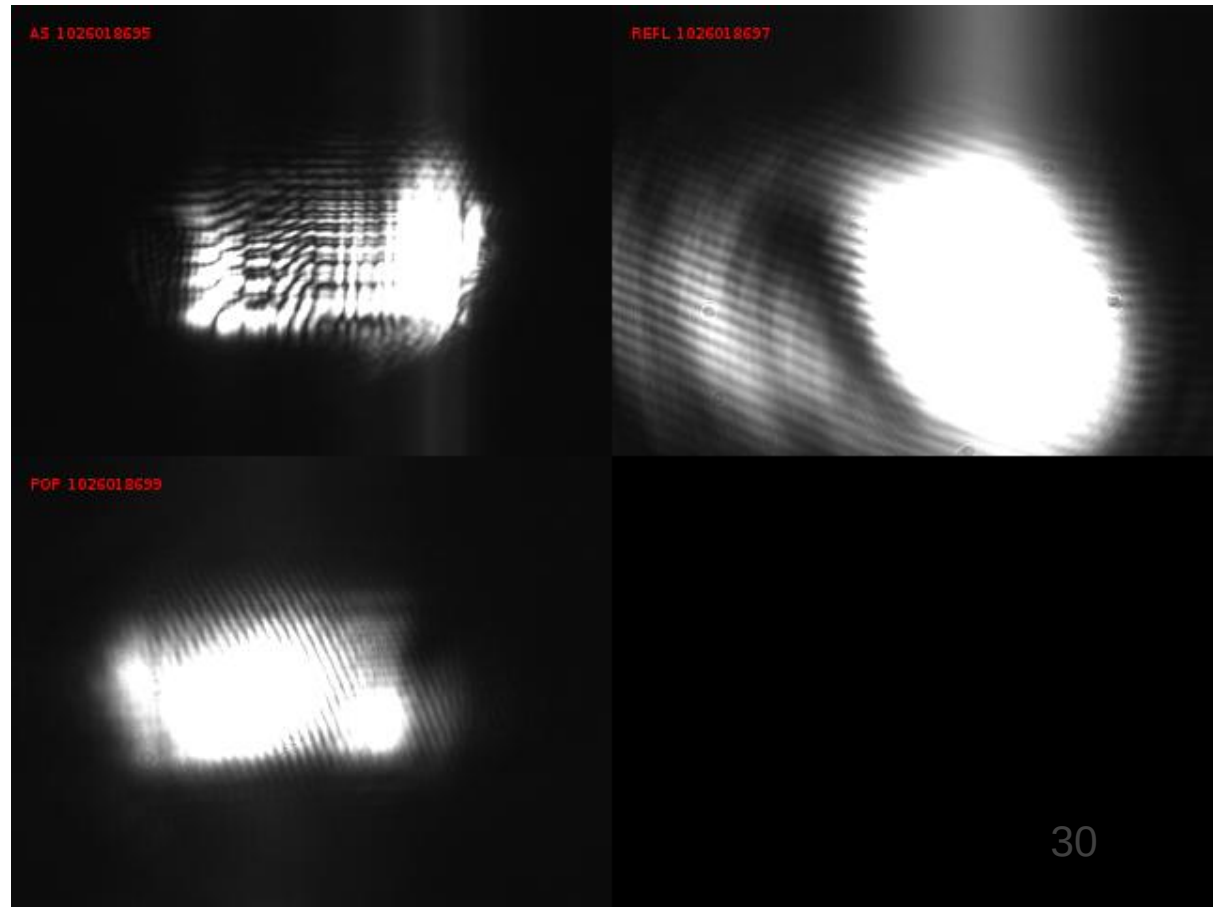
- わかったこと

1. 2.はPRC内のclippingが怪しい。3.はPRM, BS
の3 Hzの揺れからきており、揺れるとrecycling
gainが変動する。そのため、たまに制御が瞬間的に
発振して、エラー信号にglitchが出る。

PRC Mode Matching

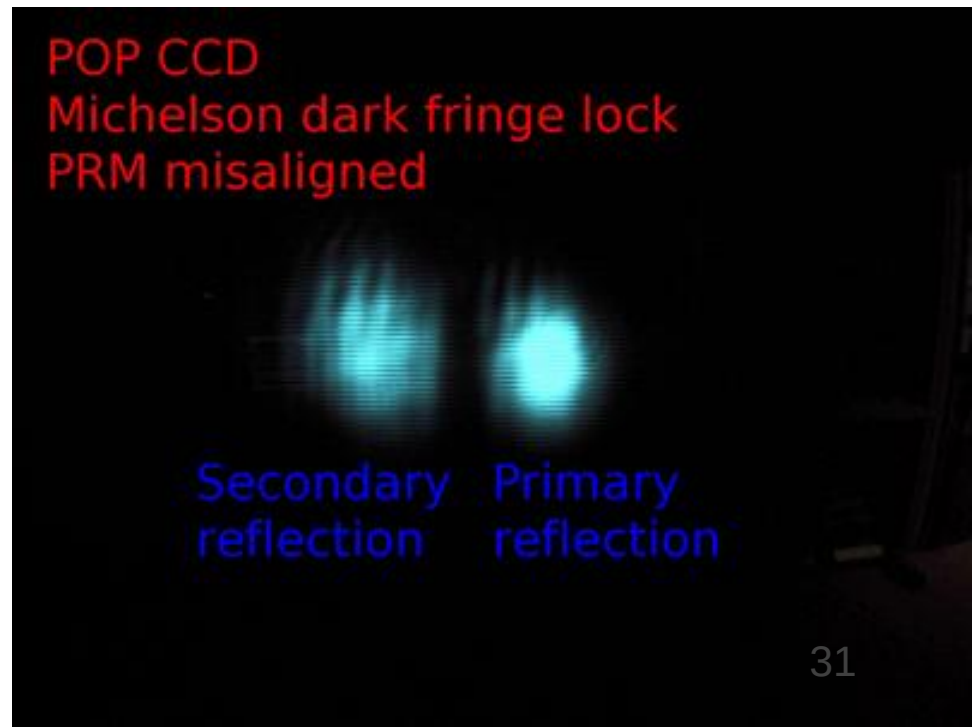
- mode scanから、入射光に問題はなさそう
- mode matchingがおかしいというか、PRC内のmodeがおかしいように見える

carrier locked PRMI
のAS/REFL/POP



PRMが反転してる説

- PRMが反転しているとしたら、unstable cavity 内部のモードが定義できない
- PRM反射によってビーム径が広がっているように見える(右下の新井さんの写真)
反転してるからではないか？
- REFLやPRM直前の pick off光のbeam profile測定等行われたがいまいち確かな証拠は得られず



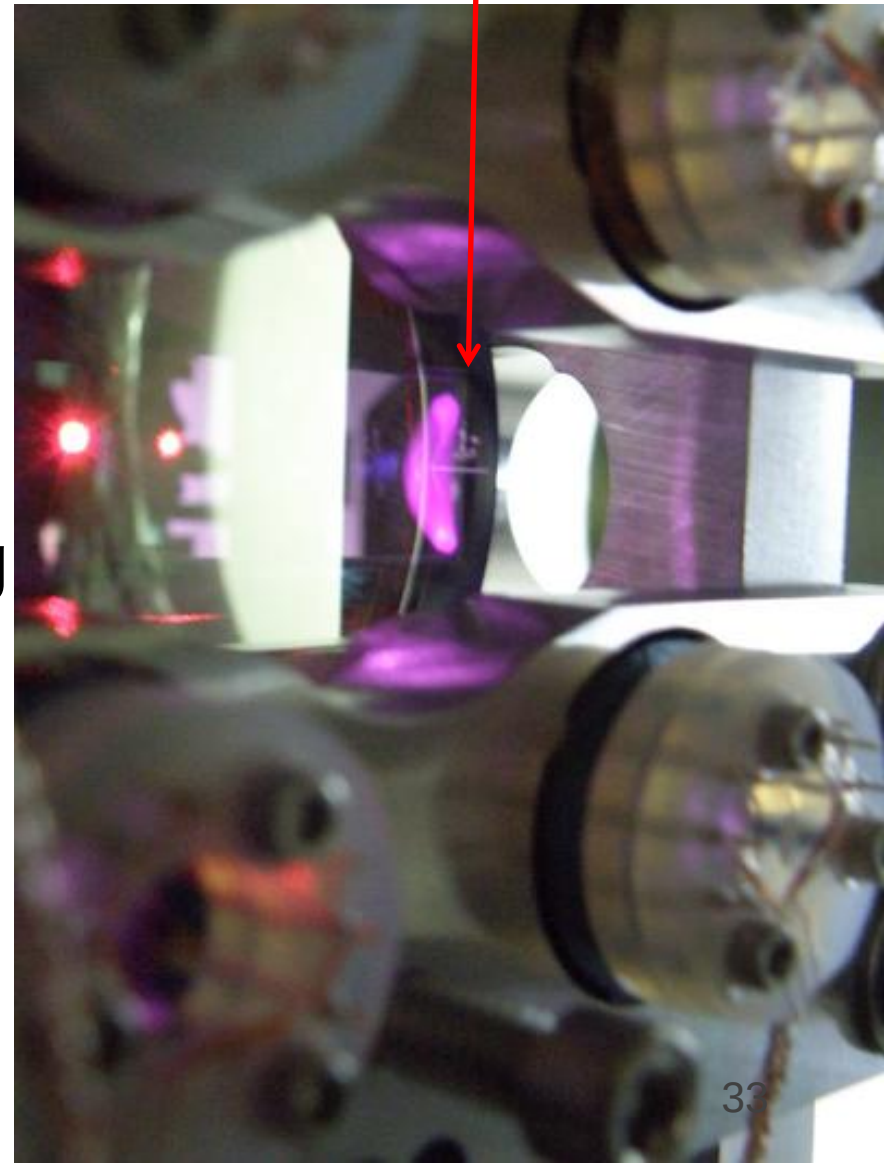
直接PRMを見た方が早くない？

- ということで、真空槽を開けた
結構悩んだが
- スケジュール
6/28(木) 真空槽空けるかどうか会議
6/29(金) 早朝からvent開始。夕方、PRM確認
結果、PRMは反転してなかった.....
6/30(土) 悶々
7/1(日) BSでのclipping発見
7/2(月) 写真とって閉める
7/3(火) 早朝からpumping
7/4(水) 独立記念日、干渉計復活

真空槽を開けて何がわかったか

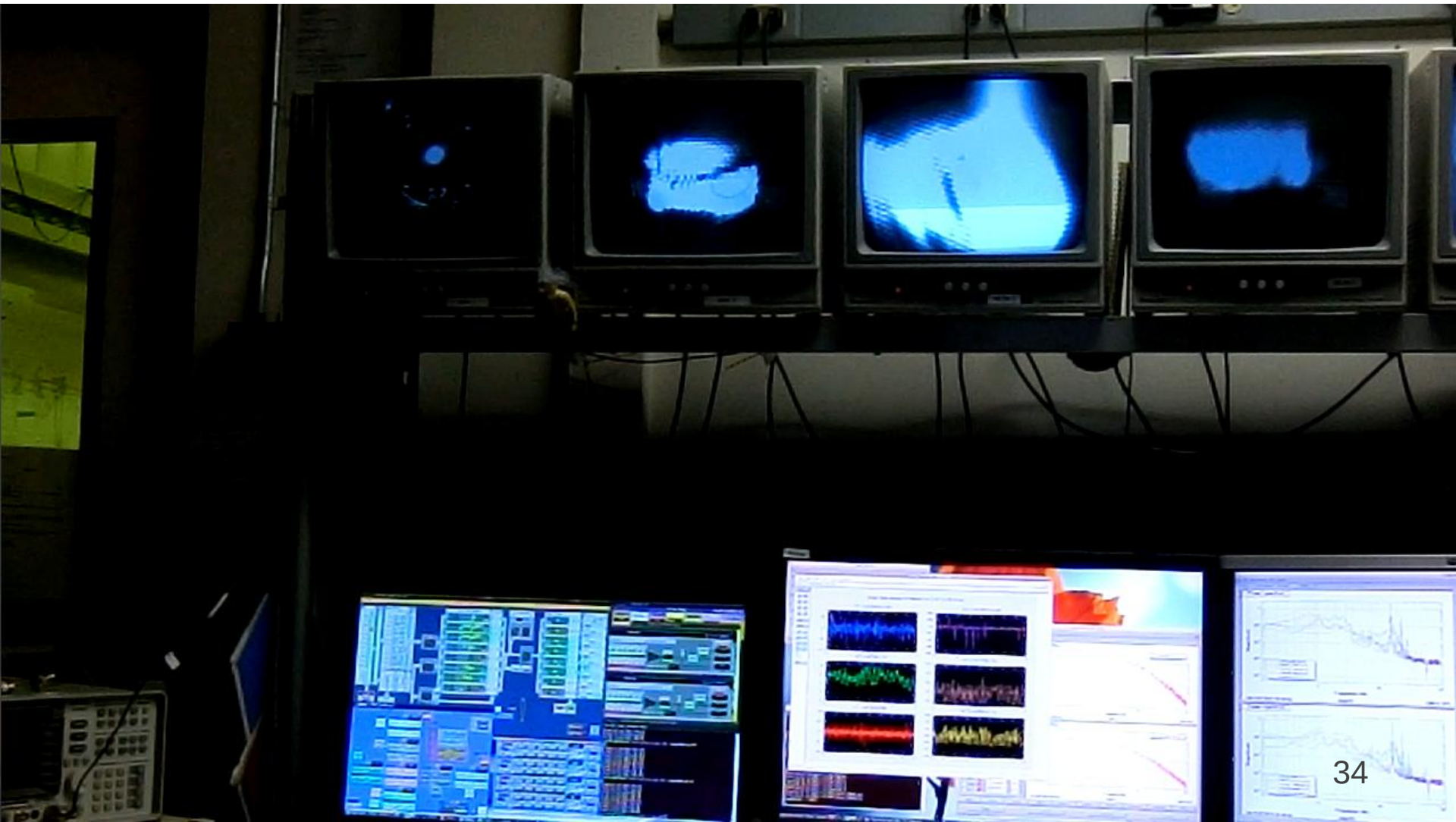
- PRMは反転してなかった
- PR2, PR3も反転してなかった
- BSでclippingがあった
腕へのmode matchはそれほど悪化させなくても、PRC内のclippingなので、PRCには大きな悪影響を与えているかもしれない
- サスペンションも大丈夫そうだった

PRMのHR面を指す矢印



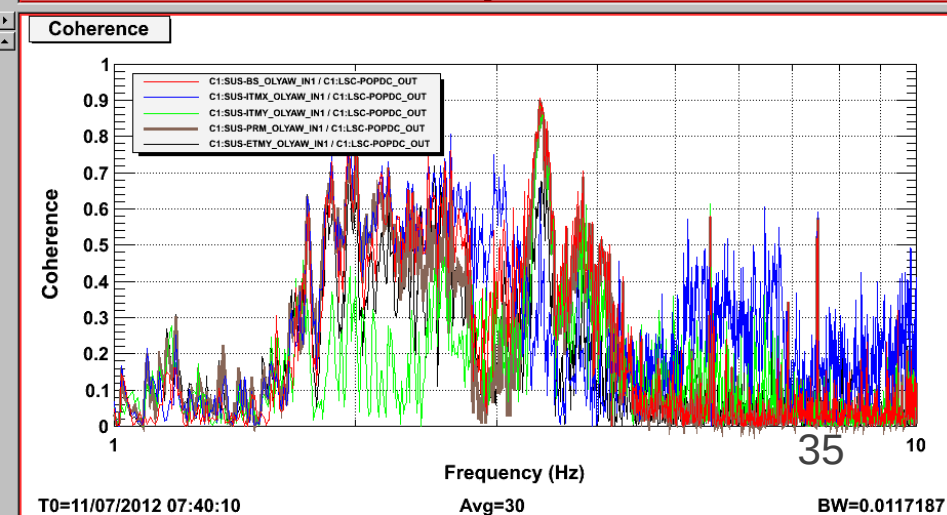
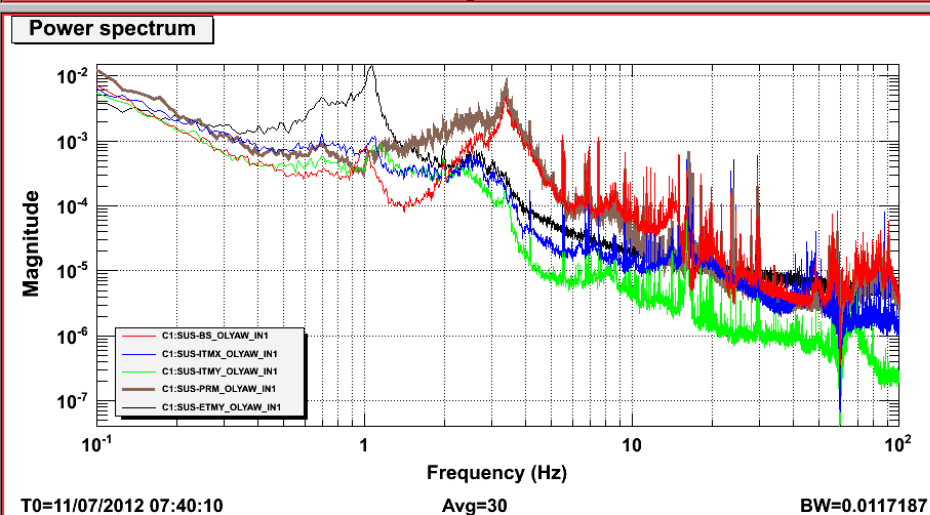
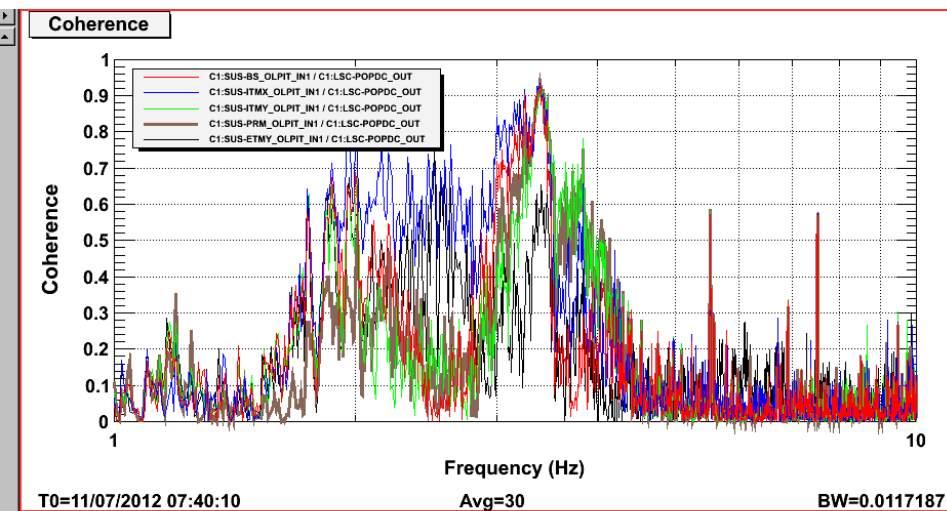
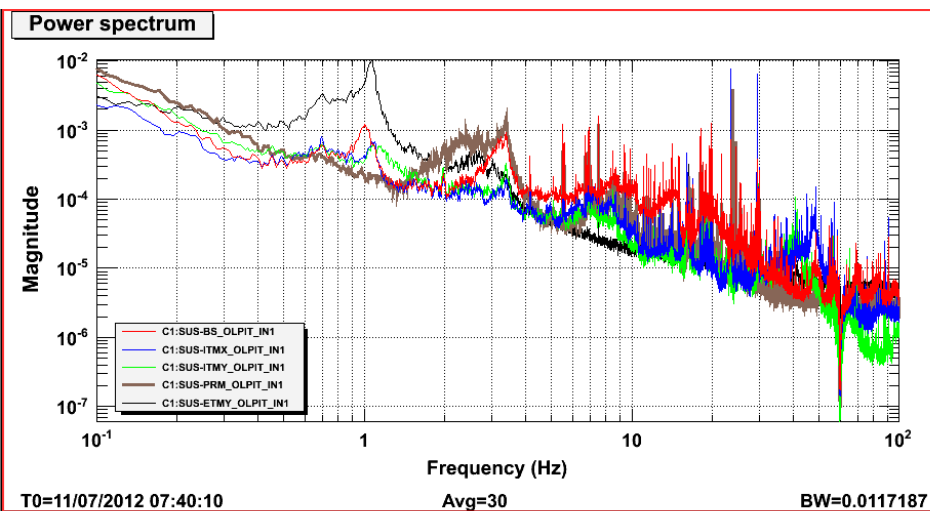
ビームの揺れ

- 動画



揺れとPRM, BSの揺れ

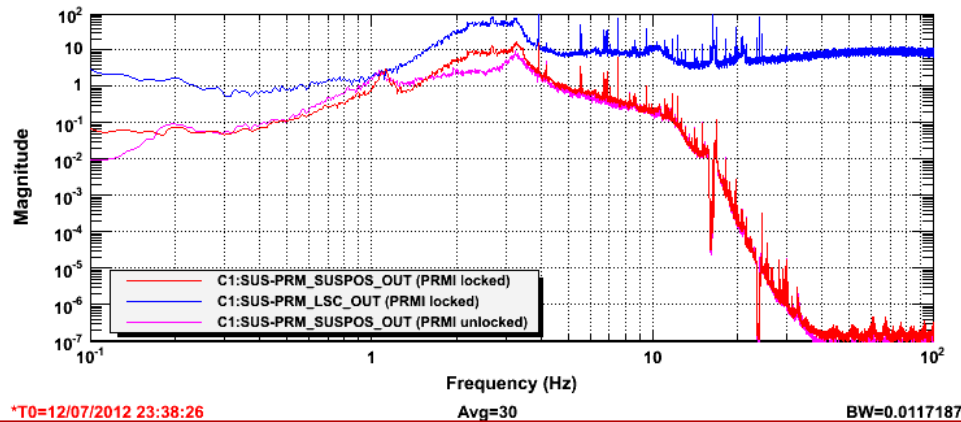
- POPDCのスペクトルから、3.3 Hzで揺れている
- PRM, BSの揺れ(oplevで測定)とPOPDCに相関



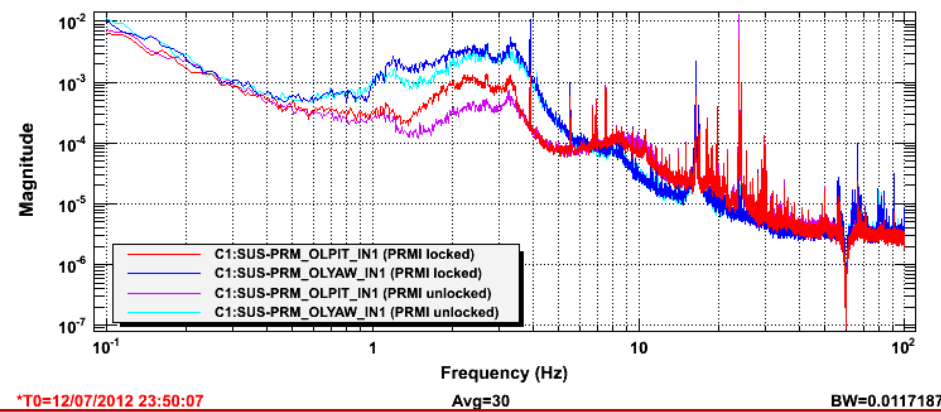
LSCによる揺れの増幅

- PRMIをlockすると、PRM, BSの揺れが大きくなる

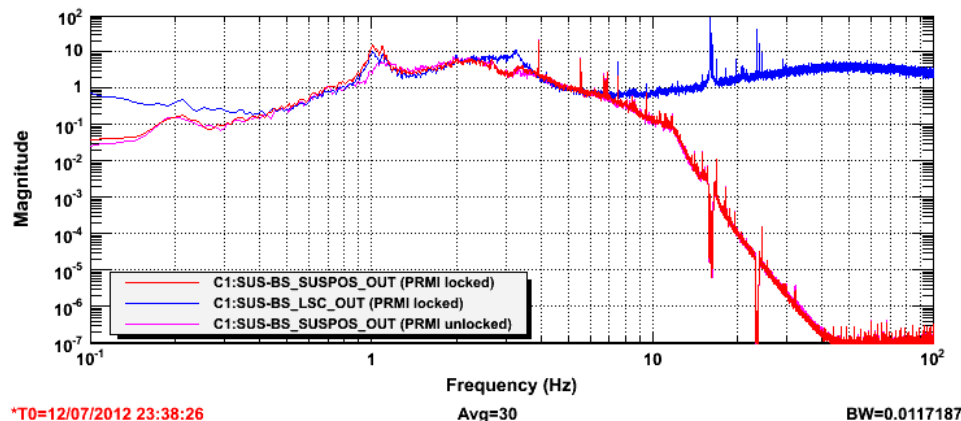
Feedback to PRM with and without PRMI lock



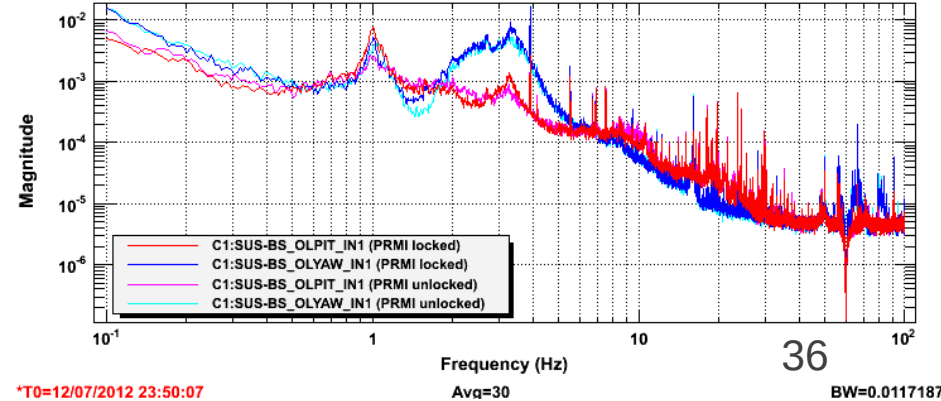
PRM OLPIT/YAW with and without PRMI lock



Feedback to BS with and without PRMI lock



BS OLPIT/YAW with and without PRMI lock



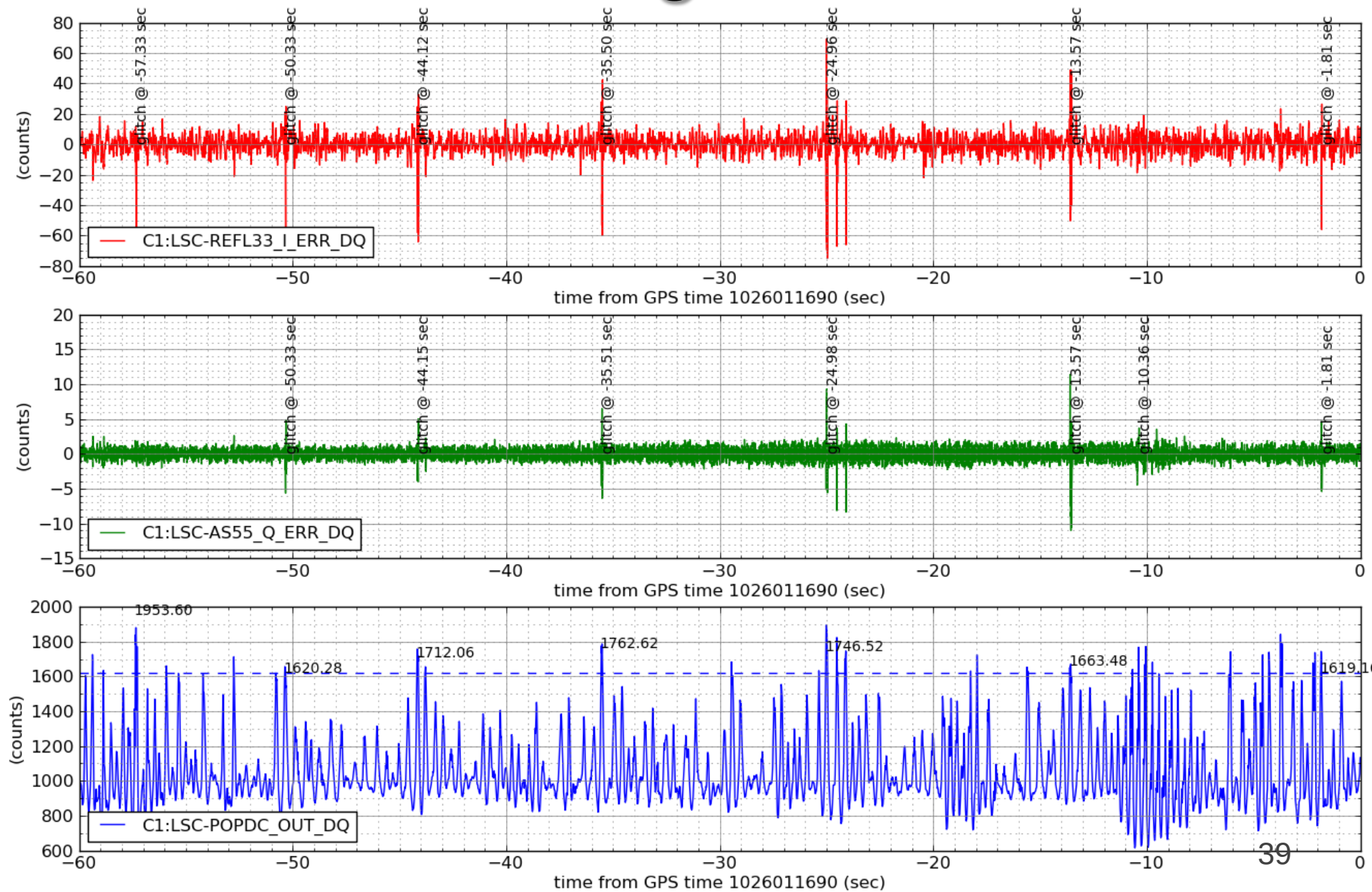
推測される揺れの原因

- PRM, BSはそもそも~3 Hzの揺れが大きい
stackの共振
- その揺れがREFLのPD上で見えてしまう
- エラー信号にそれが出てしまうので、LSCがPRM
の並進に返してしまう
- 実際には並進が~3 Hzで揺れているわけではないの
で、PRMの揺れを悪化させてしまう
(damping servoがLSCが悪化させた分を戻そう
としているのが、feedback信号のスペクトルか
らわかる)

揺れ対策

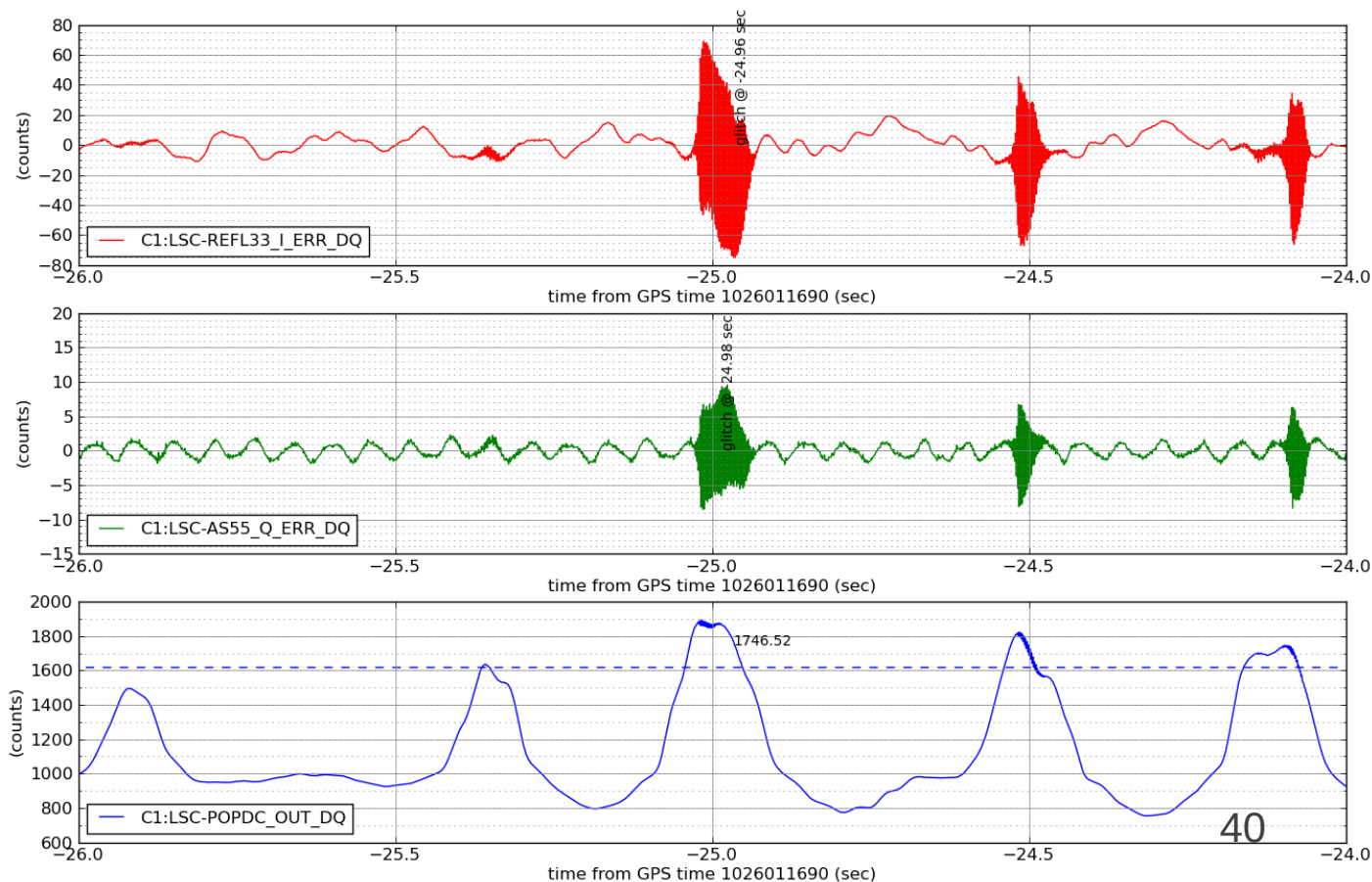
- stackの共振がどうcoupleするのか、なぜ他の鏡に比べて大きいのか探るのが一番だと思うけど
- PRMとBS, ITMX/Yが同相で揺れるなら問題ないはず。dampingをうまく調整して同相除去できないか
- PR2, PR3も怪しい
PR3はPRM, BSは同じstack上に載っている
PR2, PR3の揺れは制御できないし、モニタもできない

PRMIのglitch問題



PRMIのglitchは制御の発振

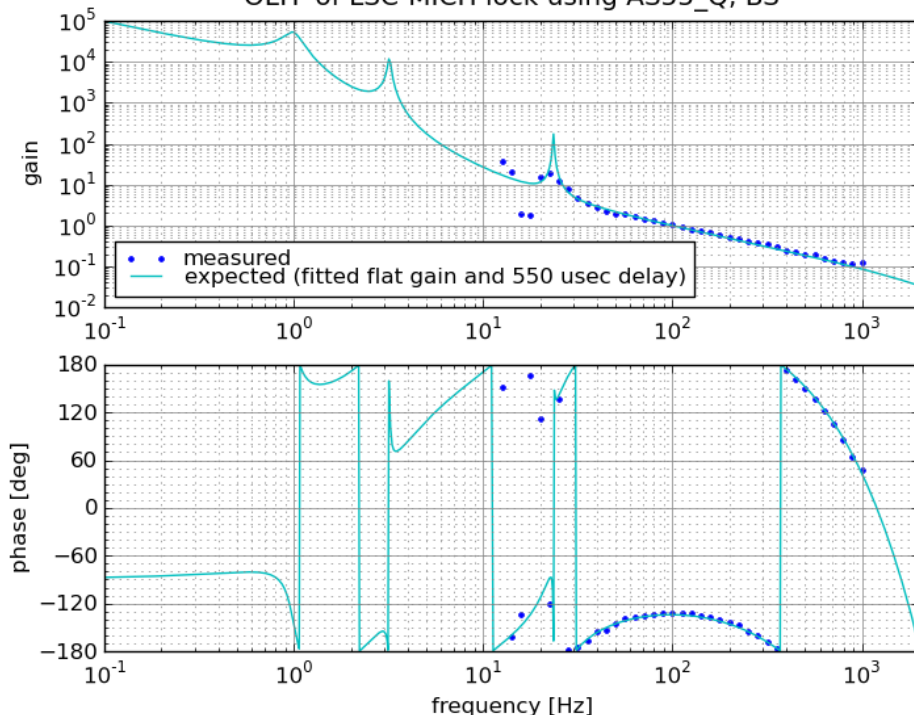
- POPが大きくなりすぎる(power recycling gainが高くなりすぎる)と制御が発振して、glitchが出る
- glitchは拡大すると $\sim 400\text{Hz}$ (=OLTFの位相反転周波数)の発振



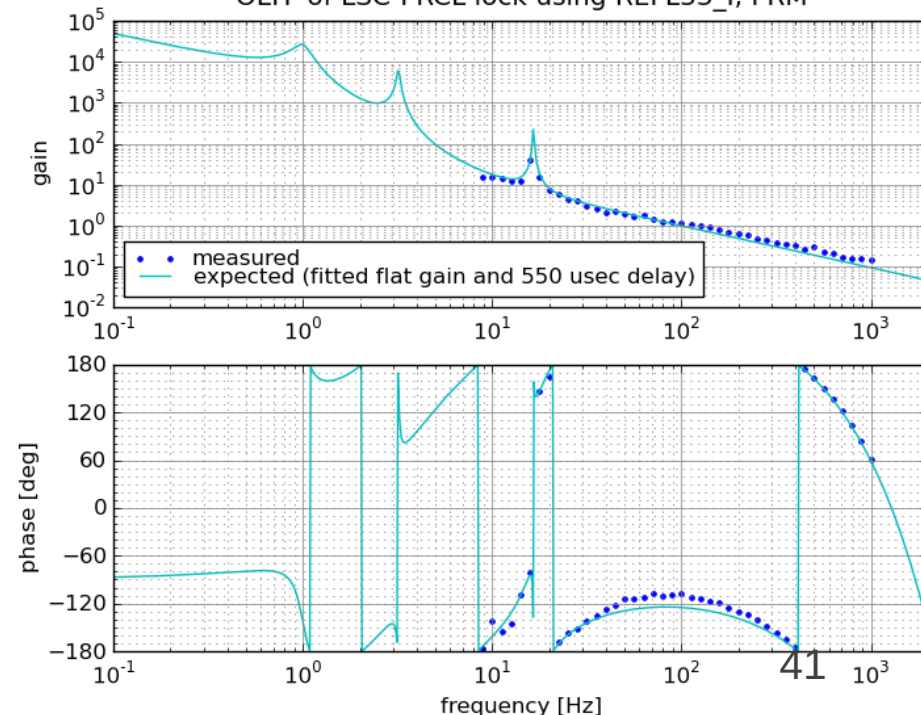
PRMI lockのgain margin

- gain margin増やして少し改善したかも
5倍power recycling gainが変動しても大丈夫
なはずだが、足りてない様子
- MICH: UGF ~ 100 Hz, phase margin ~ 50 deg
- PRCL: UGF ~ 100 Hz, phase margin ~ 70 deg

OLTF of LSC-MICH lock using AS55_Q, BS



OLTF of LSC-PRCL lock using REFL33_I, PRM

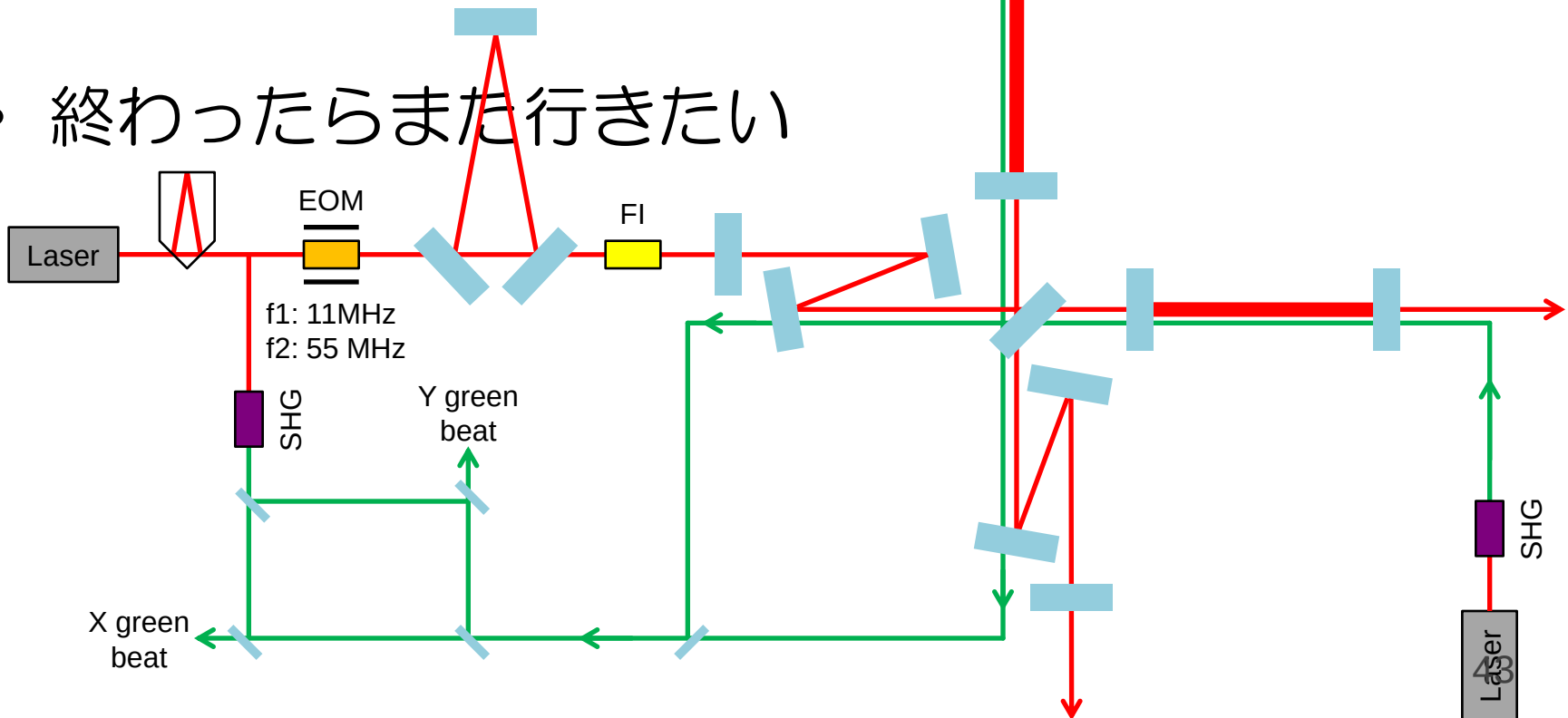


PRMIコミッショニングの今後

- BSでのclippingはなんとかしないといけない
現状ではinput PZTの片方が死んでいるので
難しい
MCのビームスポットの位置もずれてきてる
→ input PZTをtip-tiltに交換し、アライメント
はやり直した方がいい
- clippingを改善すればmode matching改善するのかの計算も必要
- ~3 Hzの揺れもなんとかしないといけない

今後の予定

- 干渉計アライメント関係の整備
steering mirrorsの導入+clippingの改善
dither alignmentスクリプト
- 新ALSの整備、雑音評価
- 終わったらまた行きたい



3. その他

人々

- Rana Adhikari (TENURE)
 - Koji Arai
 - Steve Vass
 - Suresh Doravari (moved to LLO)
 - Jamie Rollins
 - Jenne Driggers
 - Den Martynov
-
- Keiko Kokeyama (from LSU)
 - Mengyao Wang (from Glasgow)

Universal Studios Hollywood



Santa Barbara



Venus transit



4th of July



その他のニュース

- First aLIGO arm lock @ Hanford (June 27)
end greenによる片腕ロック
- IMC Flashes! @ Livingston (July 4)
MCで00の初フラッシュ
- LIGO Seminar で片道光速の実験について発表をしました (July 3)

まとめ

- 干渉計はやっぱり楽しい