advancedligo

次世代干渉計型重力波検出器のロックアクイジション

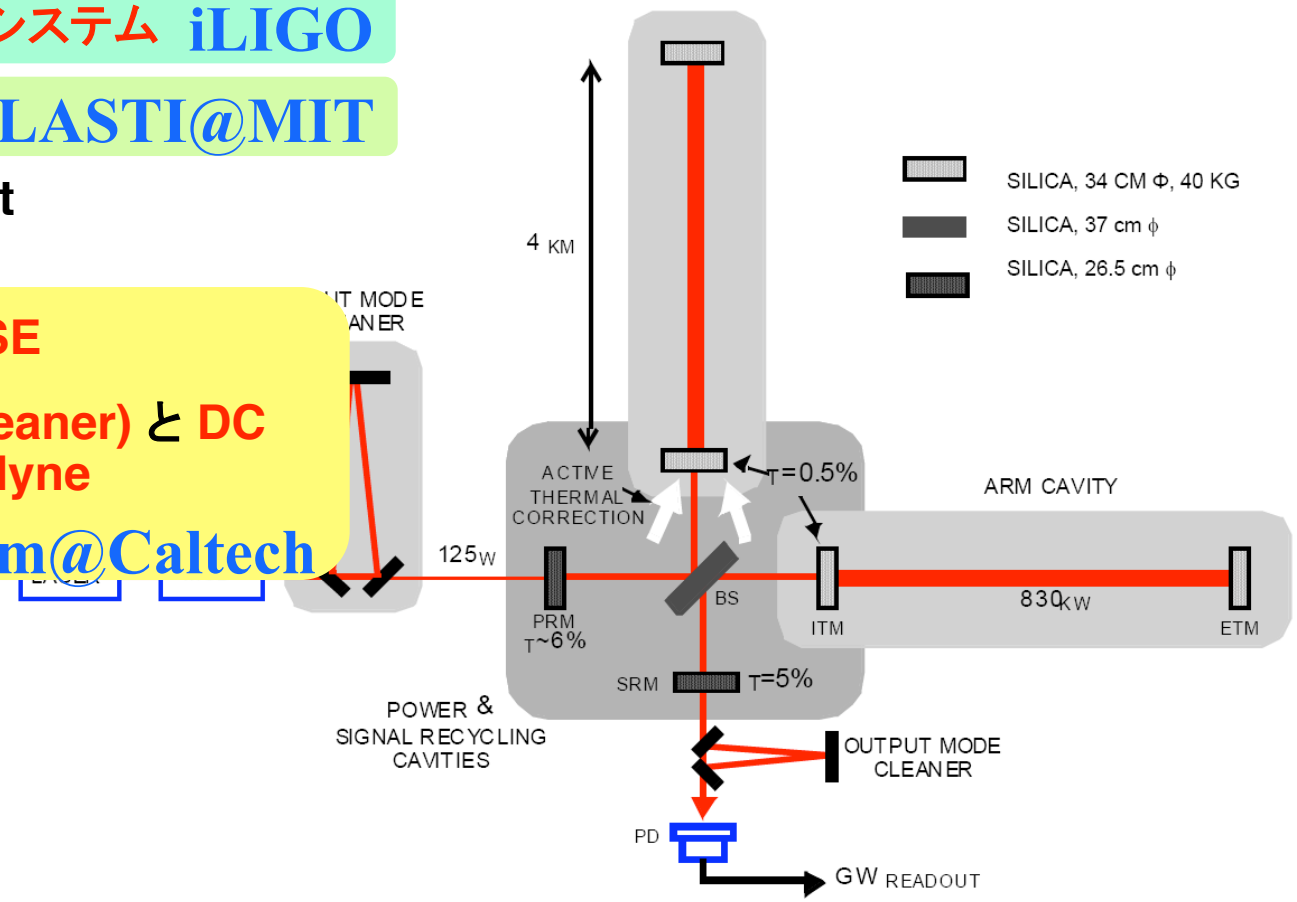
California Institute of Technology : 宮川 治、山本 博章

2007年9月22日　第62回物理学会秋季年次大会
於 北海道大学札幌キャンパス

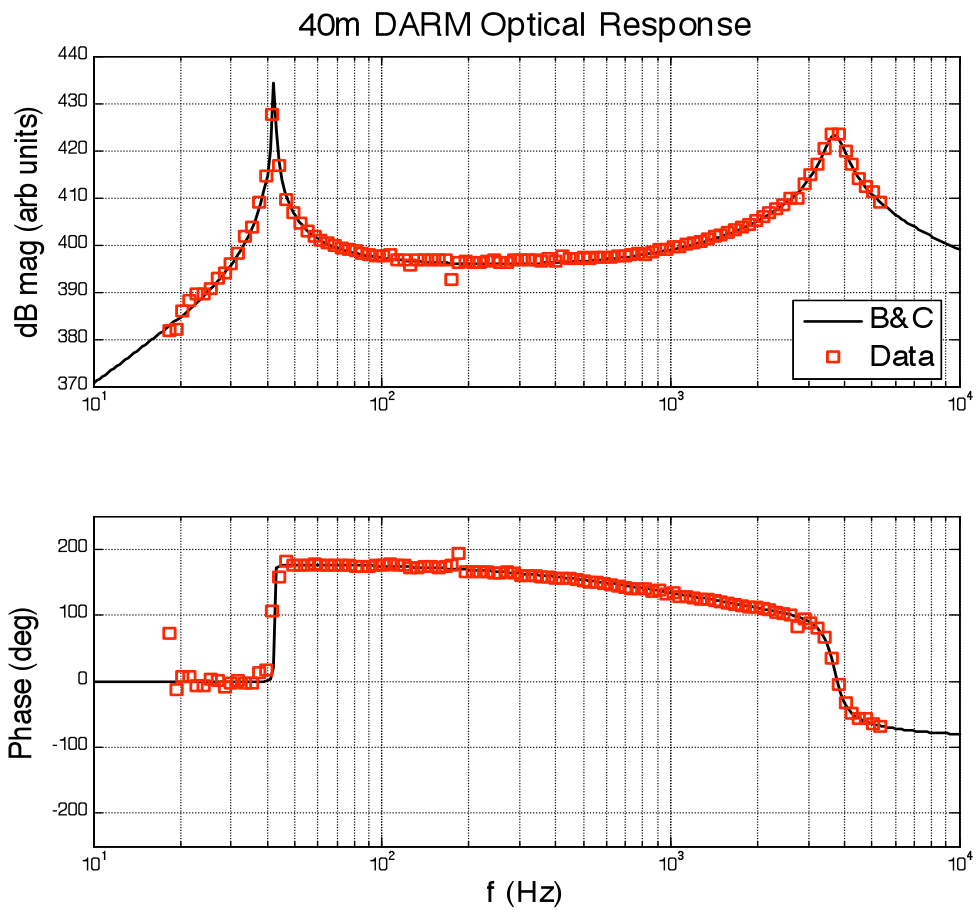
次世代干渉計型重力波検出器の特徴

- 数100Wクラスの高出力レーザー (~20x) LZH
- アクティブな低周波防振システム iLIGO
- 3 - 4段の多段振り子 LASTI@MIT
- SPI (Suspension Point Interferometer)
- 帯域可変のdetuned RSE
- OMC (output mode cleaner) と DC readout による homodyne detection 40m@Caltech

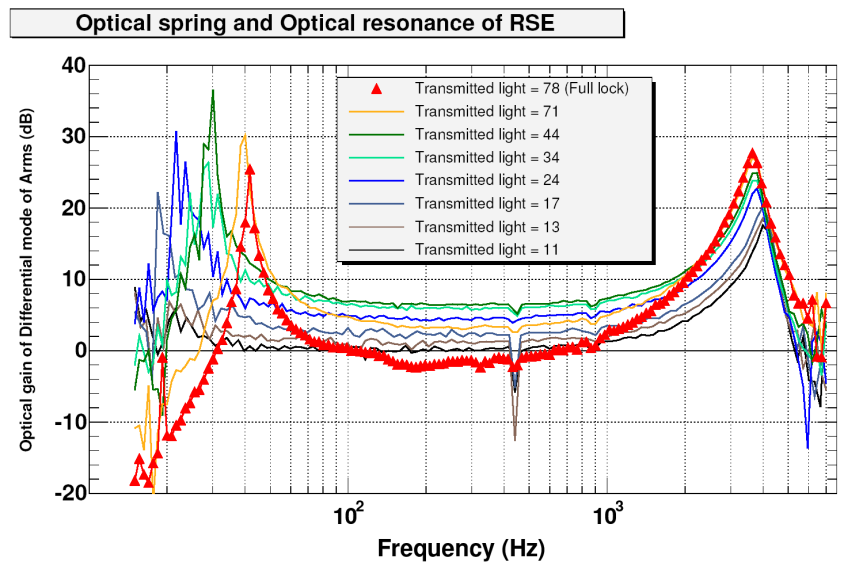
ADVANCED LIGO LAYOUT



Caltech 40mプロトタイプ干渉計での制御方法の研究



- Detuned RSE
- Double demodulation
- Optical resonance 及びoptical springによる2つのピークを確認
- 異なるパワーに対するoptical spring 周波数の移動
- DC readout



Miyakawa *et al*, Phys. Rev. D74, 022001 (2006)

Introduction

- プロトタイプ実験で制御方法に関してはうまくいくことはわかった
- 200Wクラスの高出力レーザーを使った次世代干渉計（LCGTやAdvanced LIGO）ではどんなことが起こるのだろう?
- ロックは可能か?
  - 多段振り子
  - 静電アクチュエータ（これまでのコイルマグネットアクチュエータに比べ力が弱い）
  - 高フィネス ~1200
  - 輻射圧 (~1MW)
- とりあえず一本の腕キャビティーのロックを時間領域のシミュレーションで調べてみよう。
- 目標は、一本腕は最初のフリンジでロックすること。これは5自由度のRSEのロックにおける最小要求である。

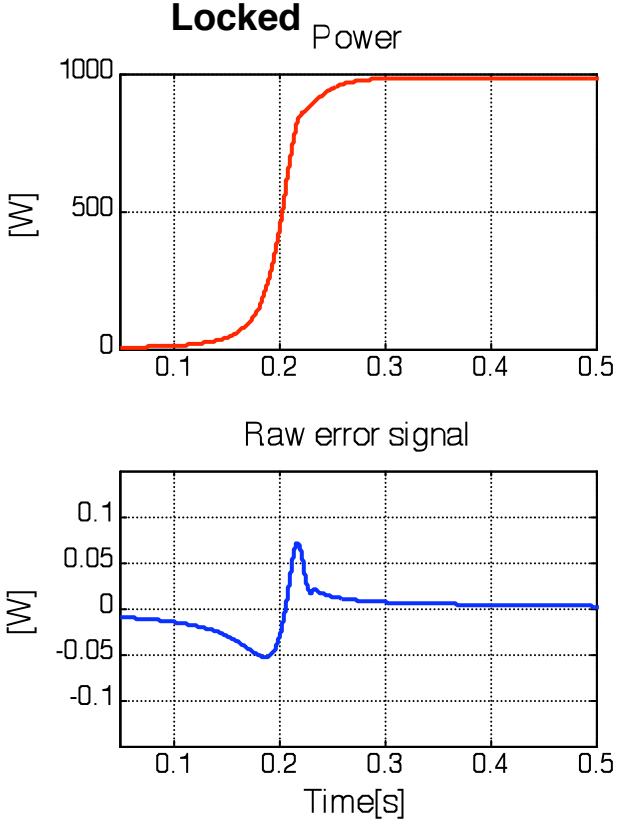
Parameters in this simulation

- 時間領域でのシミュレーションツール「e2e」を使用
- 4km single arm cavity
- AdLIGO 4段振り子
  - ローカルダンピング (Top Massの6自由度)
  - Maximum actuation force: 2段目に200mN, 3段目に20mN, 最終段に450μN(静電アクチュエータのため小さい)
  - 光軸方向のUGF: 2段目は8Hz、3段目は40Hz、最終段は180Hz
- PHD法による位相変調、復調での誤差信号
- ロックアクイジション時には最終段のテストマスにのみフィードバック、ロック後は下3段にフィードバック
- 角度揺れはTEM01, 10まで考慮されている
- 現LIGO、Hanfordサイトの地面振動からAdLIGOの地面振動を予測

通常のPDH法を使ったロックアクイジション

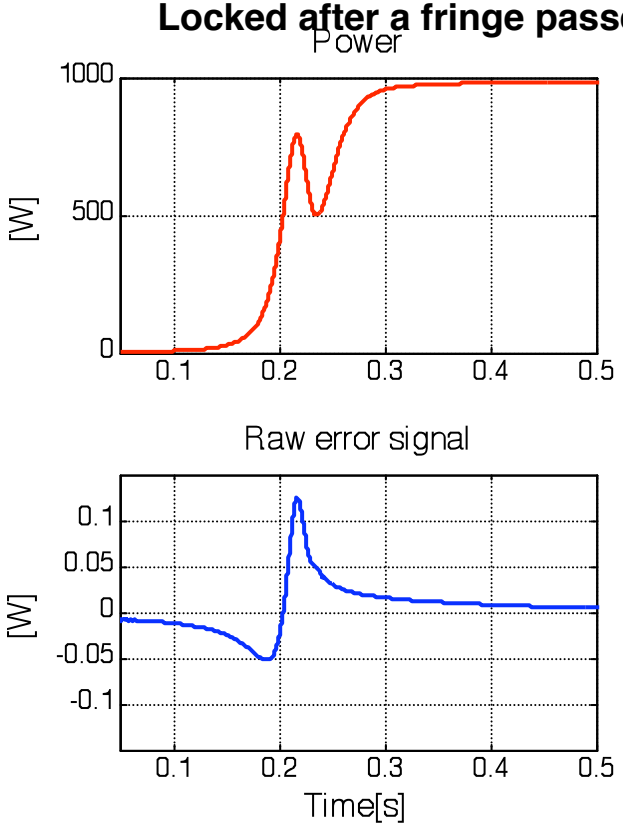
v=20nm/sec

Locked



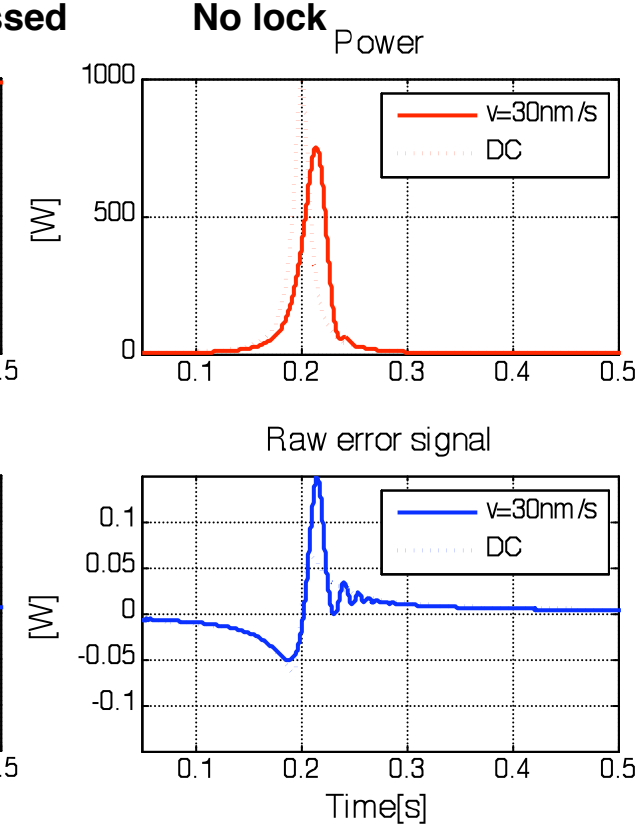
v=25nm/sec

Locked after a fringe passed



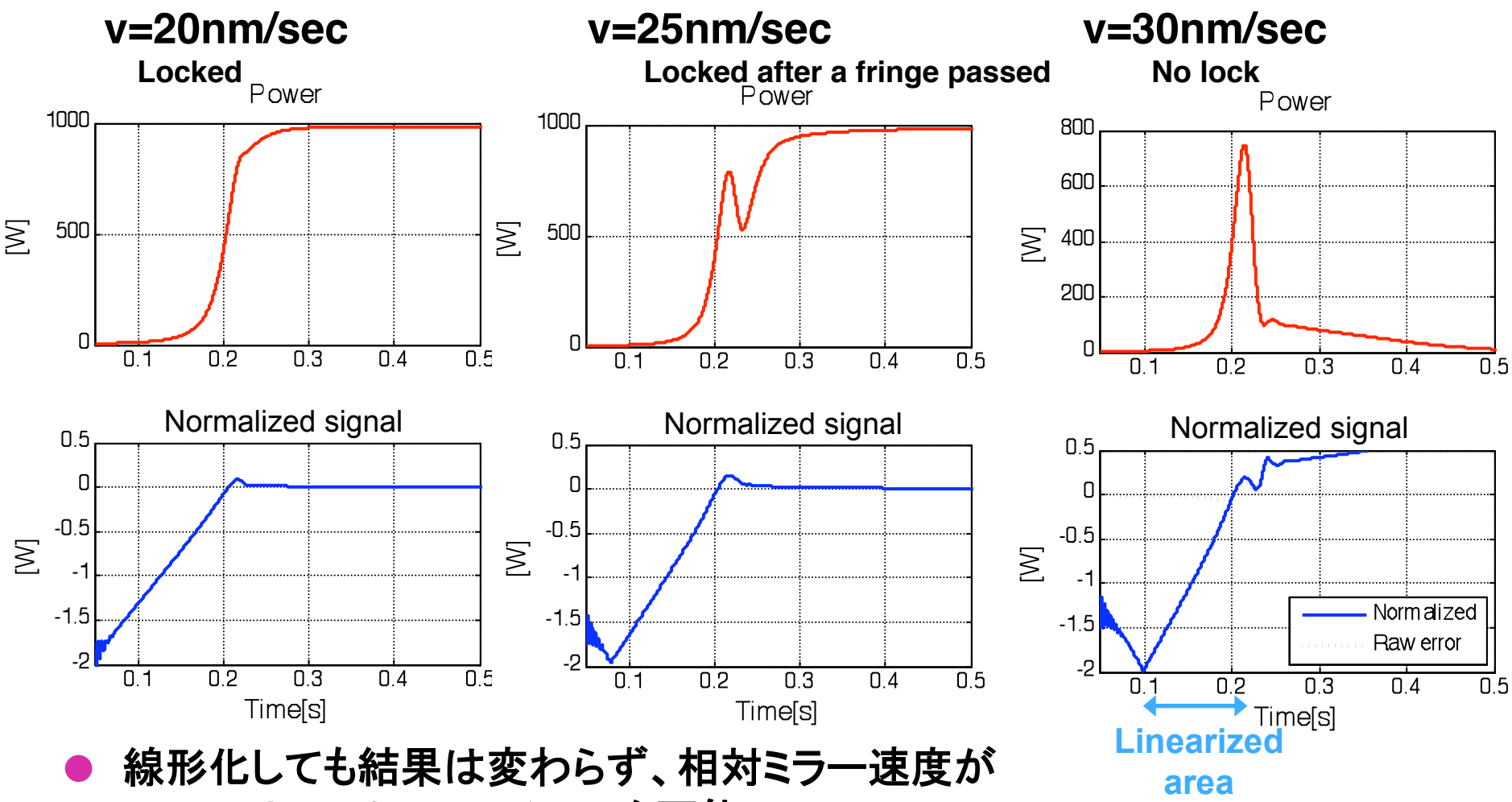
v=30nm/sec

No lock



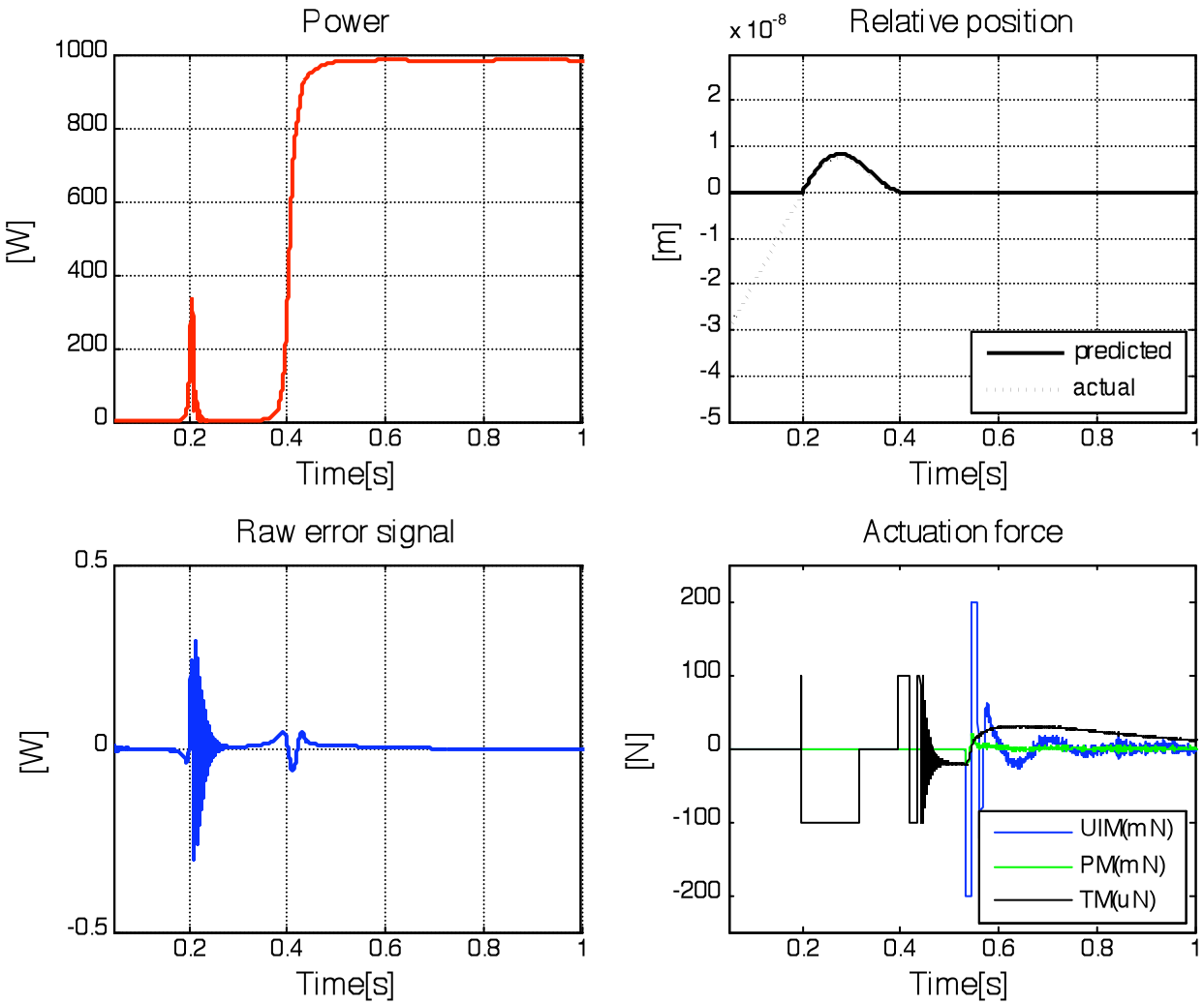
- 輻射圧が無視できるくらい小さいパワー（ロック時でキャビティー内パワー ~1kW）
- 初速度vを与えロックできるかどうか調べる
- 相対ミラー速度が ~25nm/sec以下ならロック可能
- リンギングにより、エラーシグナルの符号が反転するのがロック失敗の原因
  - » 長いキャビティー長、高いフィネス、速い相対ミラー速度に依存

透過光を使った線形領域の拡大(iLIGO, TAMA)



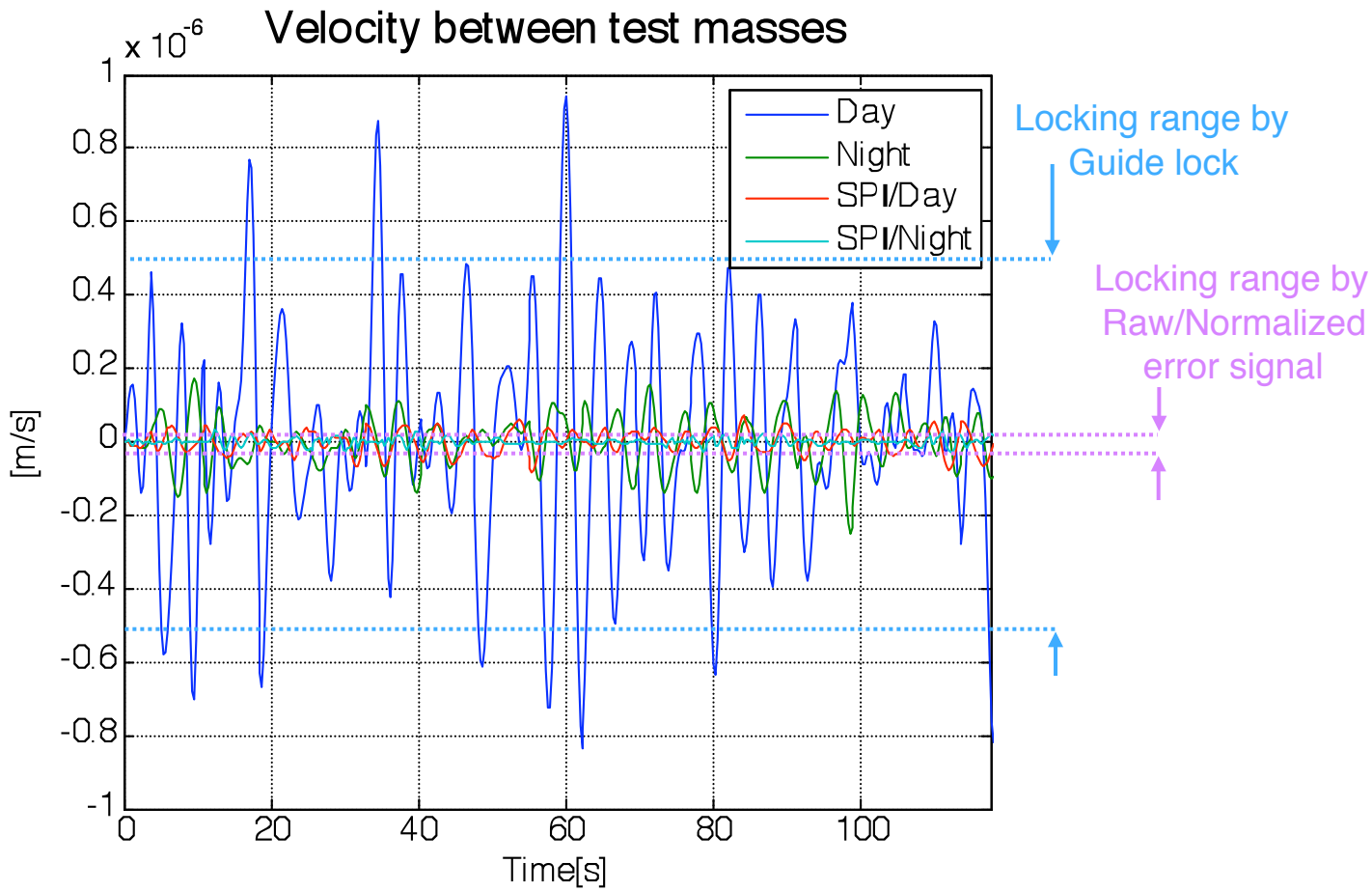
- 線形化しても結果は変わらず、相対ミラー速度が~25nm/sec以下でのみロック可能
- 現在主流の、透過光による線形化は効果的ではない

Guide lock



- 最初のフリンジの生の誤差信号のサインと傾きを利用(0.2sec)。これからその後の鏡の位置と速度を計算機内で予測。このとき生の誤差信号はリンギングを始める。
- 最初のフリンジを通過後、計算機上の情報を元に、フリンジを戻すようにアクチュエータに最大の力をかけ、戻ってきたとき(0.4sec)にロックできる程度のゆっくりした速度になるように調節する。
- このアルゴリズムにより500 nm/s (通常の誤差信号を使った場合より約25倍速い速度)の速い動きでもロックできる。

鏡間の相対速度



- LIGO Hanford サイトの地面振動にAdLIGOの防振装置を仮定
- Day: upper 10% of noisy time
- Night: 1/5 motion of the day time
- SPI: 低周波でミラー地面振動1/10を仮定 (0.1Hz zero and 1Hz pole)

ロックのまとめ

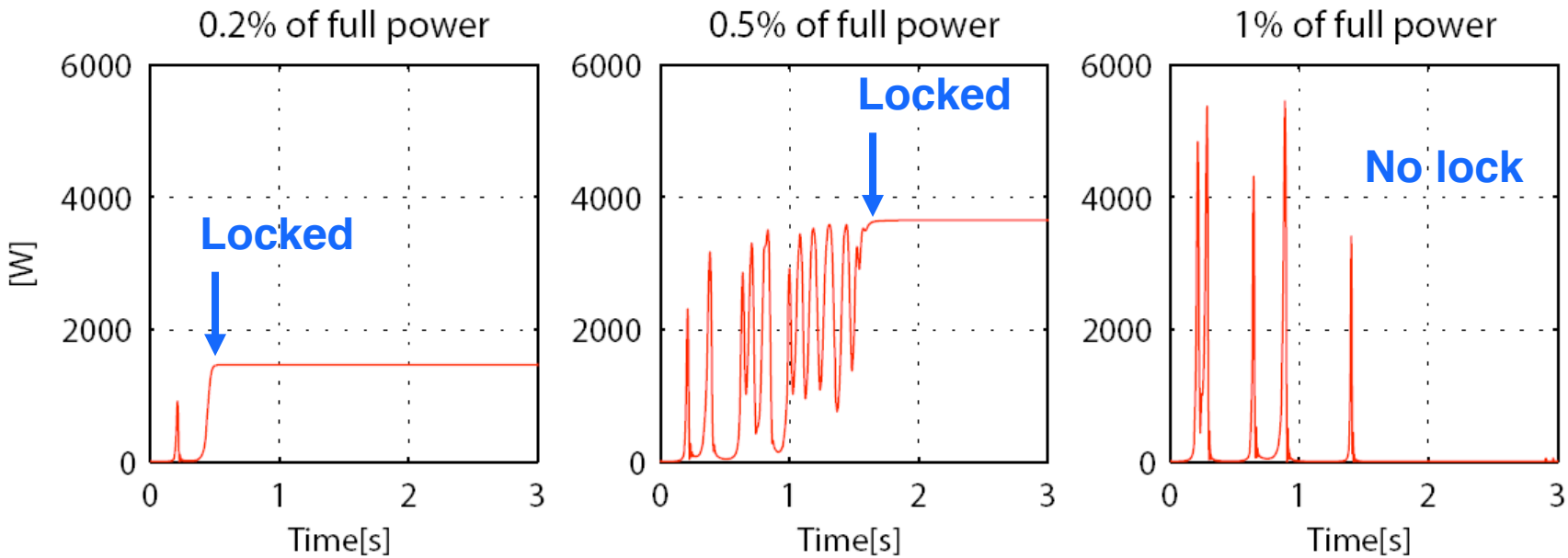
●鏡が共振点を通過したときのロックの可能性

	Lockable mirror speed	Day	Night	SPI/Day	SPI/Night
Raw/Norm error	25nm/sec	9.5%	32%	56%	98%
Guide lock	500nm/sec	90%	99%	100%	100%

●ガイドロック単体、もしくはSPIの併用でほぼ一日中腕のロックは可能

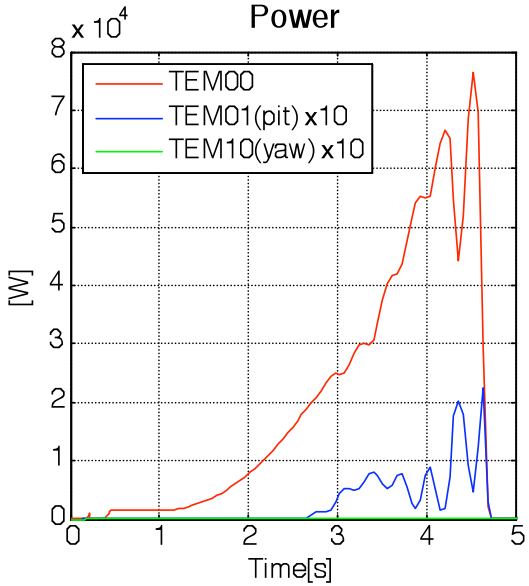
ここまでは輻射圧が無視できるほど低いパワーでのロックの話、次に輻射圧が効くようなパワーがある場合を検証

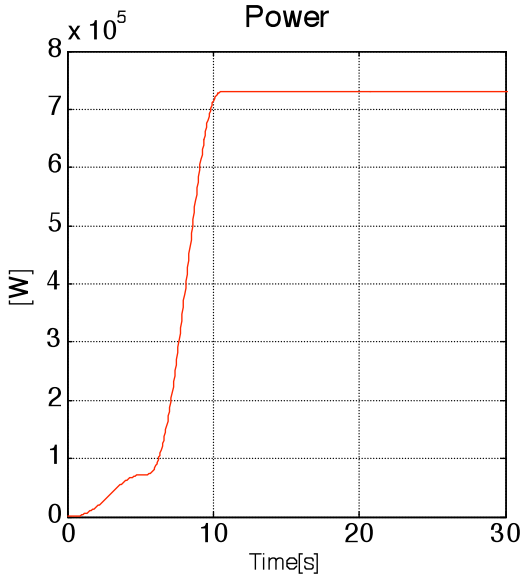
輻射圧がある場合のロックアクイジション



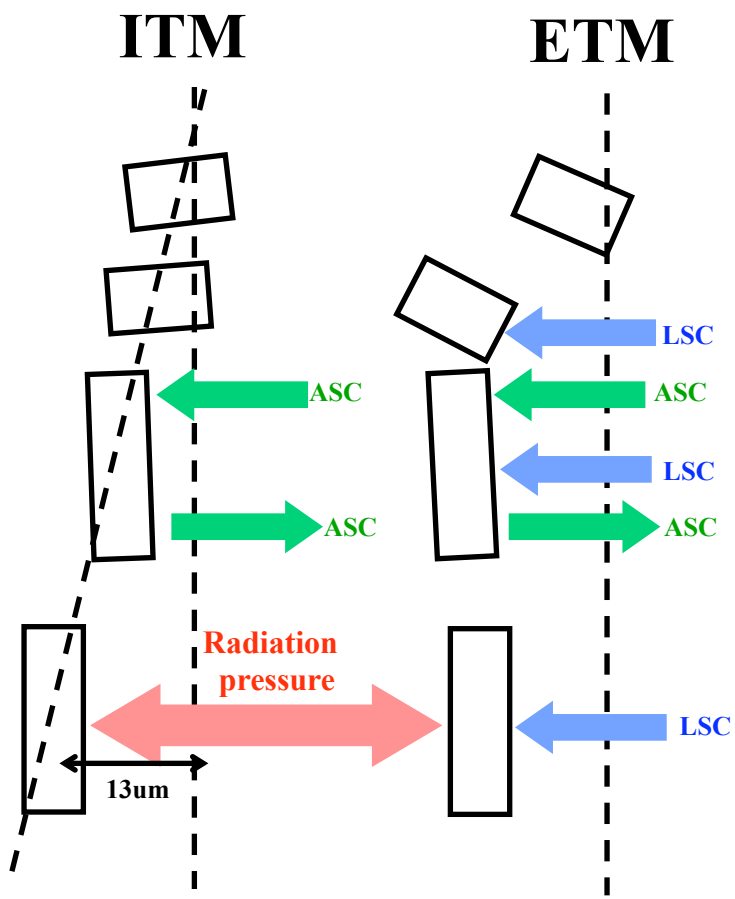
- 輻射圧により光軸方向に鏡が押されロックが邪魔される
- 最終的にたまるパワーは800kW程度
- しかしながらロック可能なパワーはわずか 数kW(0.5%程度)

Angle stability with/without ASC due to radiation pressure

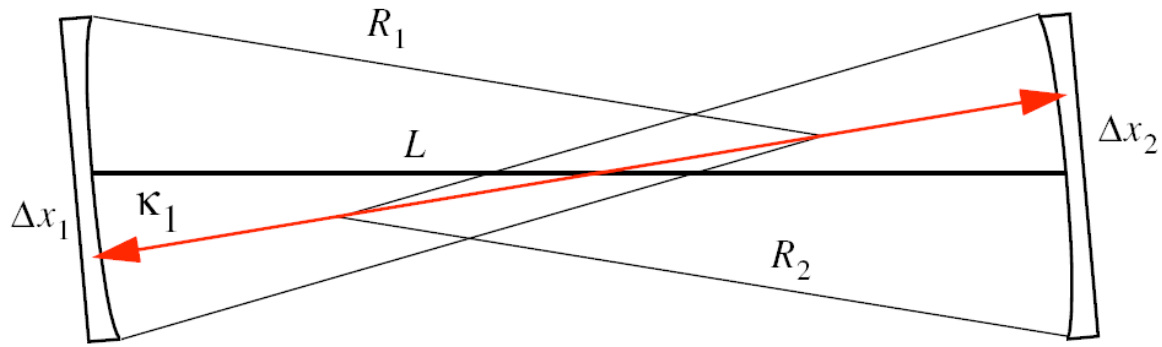




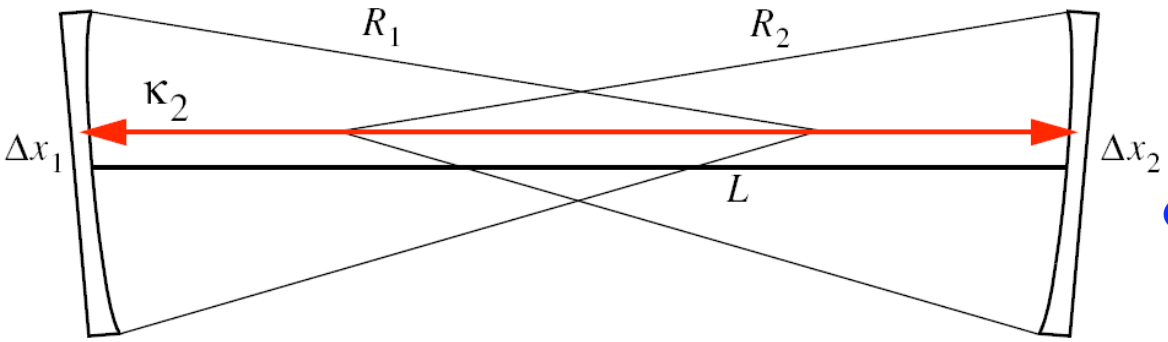
- 約10%のパワーがたまったところで輻射圧によりピッチ方向に傾くためロックが落ちる
- 下から2段目のマスにf^3のフィルターを用いた制御をかけ、最終段のマスを制御することにより、最終パワーまで持っていくことができる
- 角度方向の光バネによる不安定性のため、約10Hzの制御バンド幅が必要になる



Two modes of optical instability

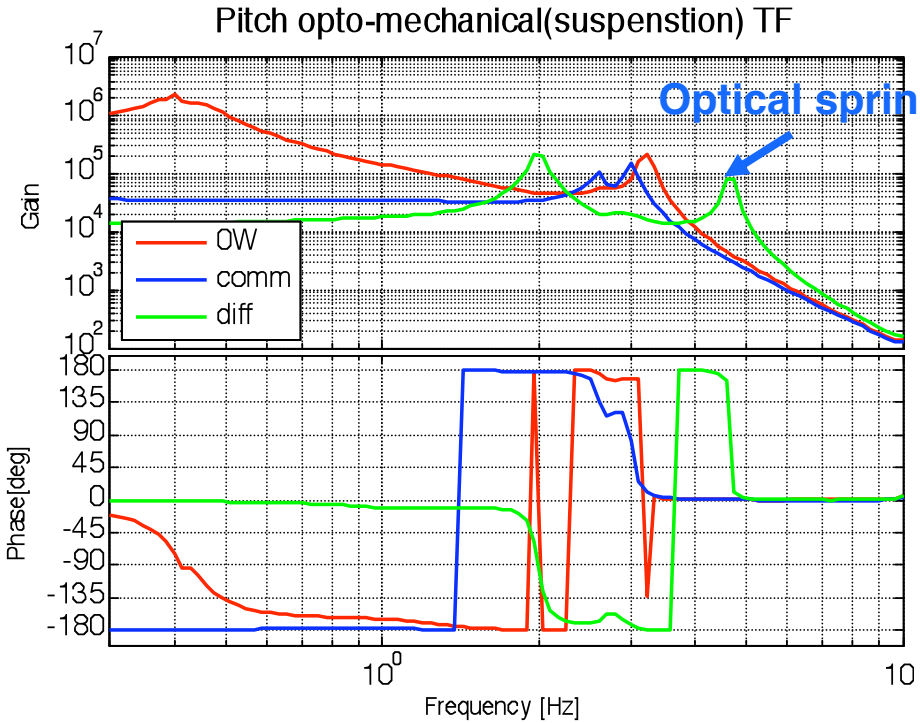


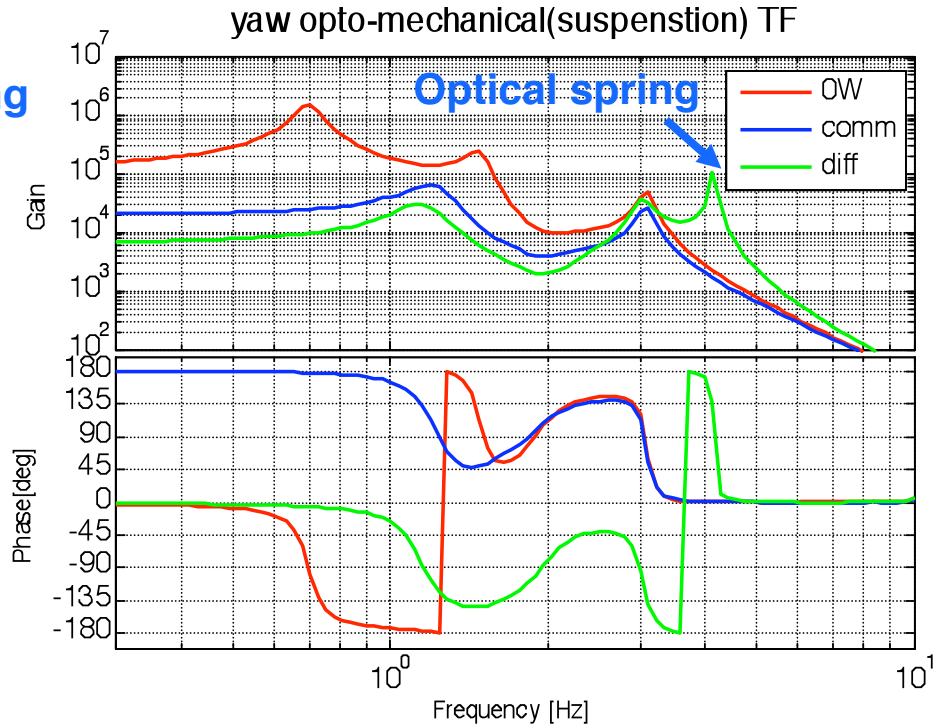
Differential : stable -> spring



Common : unstable -> anti spring

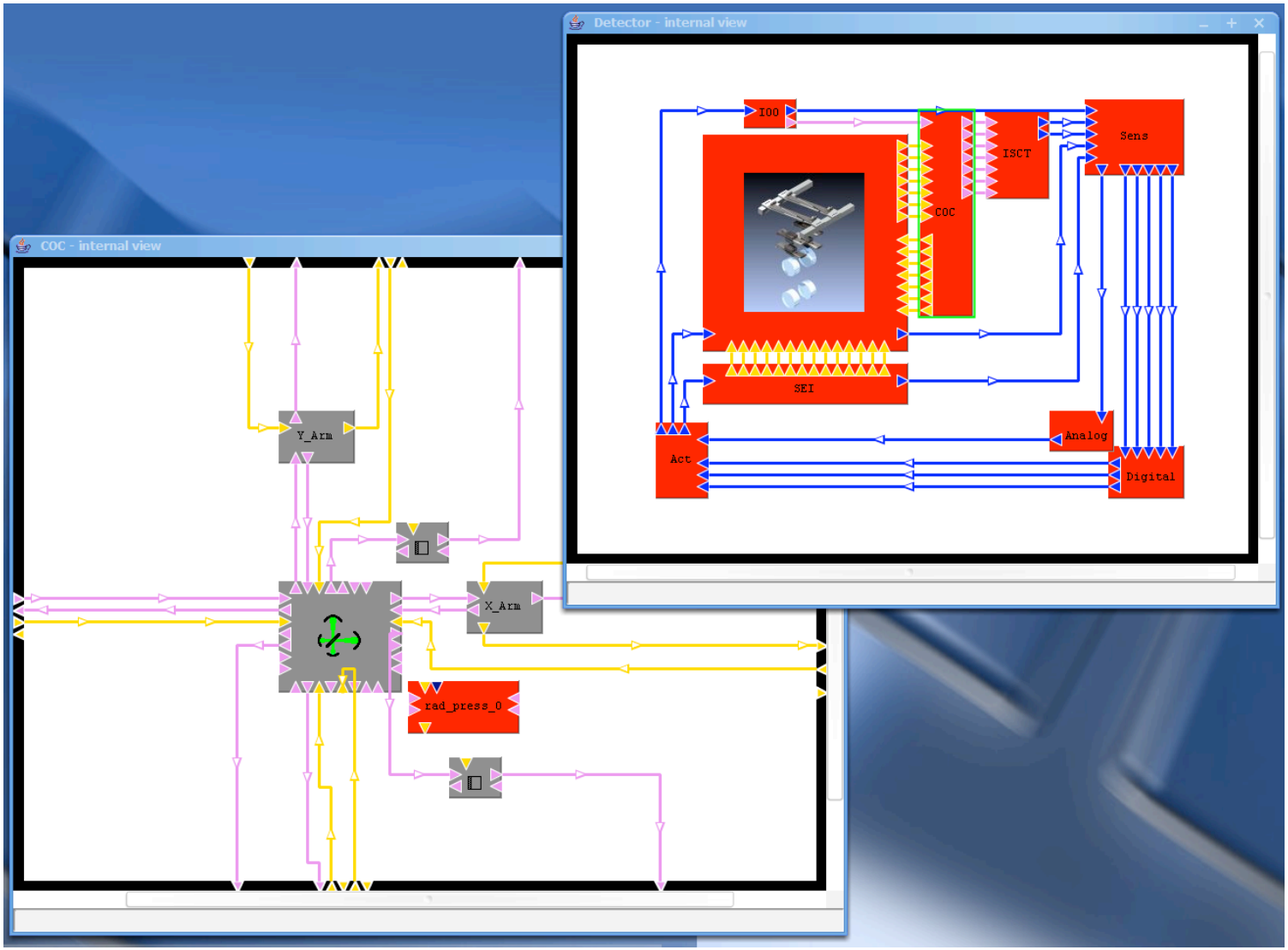
Opt-mechanical (suspension) TF





- アクチュエータから角度の誤差信号までの伝達関数(時間領域で計算されたものをFFTしたもの) で、振り子及び、光共振器の伝達関数を含む。
- 光バネにより低周波のゲインが小さくなる
  - » フィードバックフィルターによる補正が必要となる
- 光バネの共振がpitchの差動モードに4.5Hz、yawの差動モードに4.1Hzにでる。
  - » 制御のバンド幅は少なくともこの光バネの共振周波数以上にとる必要がある。

Conclusion and Next step

- 長基線長、高フィネスキャビティーのロックは、ミラーの速度によりリンギング(発振)が発生してしまい、ロックが困難になる可能性がある。
- これを回避する方法として、SPIもしくは今回提案したGuidelockを使うと、夜間は高い確率で、併用すると昼間も高い確率でロックする。
- さらに、高出力レーザーによる光軸方向への輻射圧により鏡が10波長ほどシフトするため、ロックを可能にするには最大パワーの0.5%ほどでのロックを要求される。
- また、角度方向への光バネによる不安定性が角度制御の最小帯域を制限してしまうために、フィードバック信号によるノイズの混入が問題となる可能性がある
- 次の検証: full RSE

AdLIGO on E2E