



# SPI検証のための ロックアクイジションの考察

2009/5/19(火) LCGT SPI 特別作業班  
東京大学宇宙線研究所 宮川 治



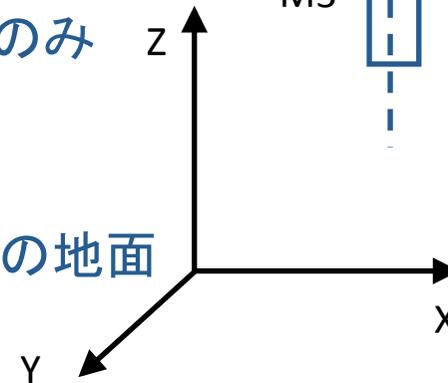
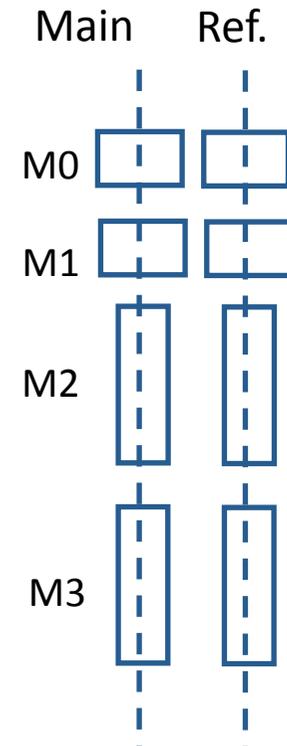
# Introduction

- SPIを導入することでロックアクイジションにどんな利点があるのかを検討
- 新しく計算し直す時間がないので、とりあえずAdLIGOモデルでの計算だが、ある程度定性的な話是可以するはず
- 同時に200Wクラスの高出力レーザーを使ったkmクラスのキャビティーでのロックアクイジションのどこが大変なのかを紹介
  - » 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)
- RSEは計算量が膨大になるので、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FRINGE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100 $\mu$ N(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

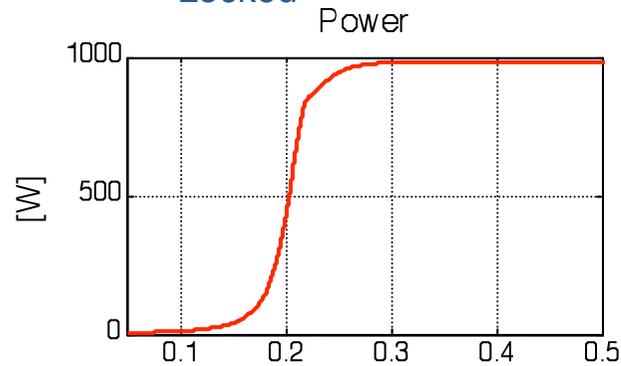




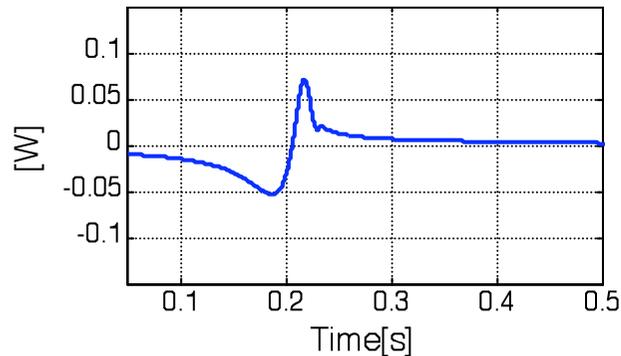
## 通常のPDH法を使ったロックアクイジション

$v=20\text{nm/sec}$

Locked

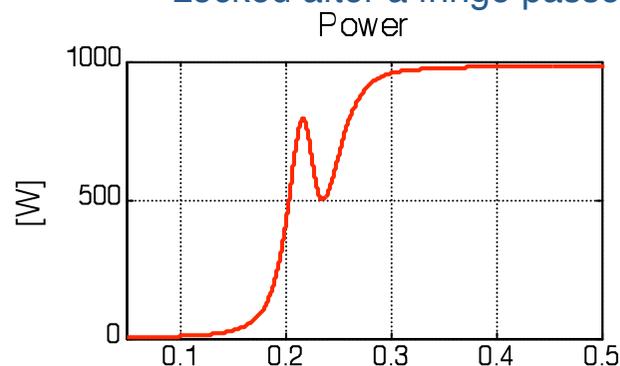


Raw error signal

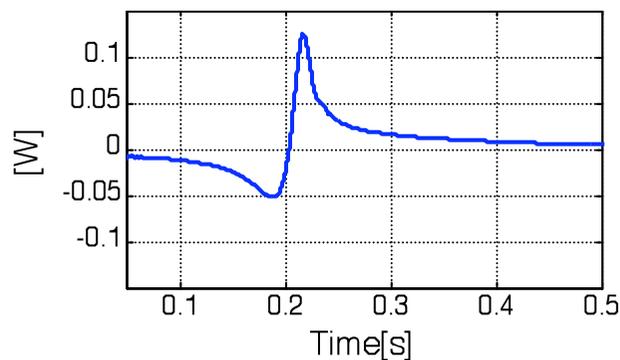


$v=25\text{nm/sec}$

Locked after a fringe passed

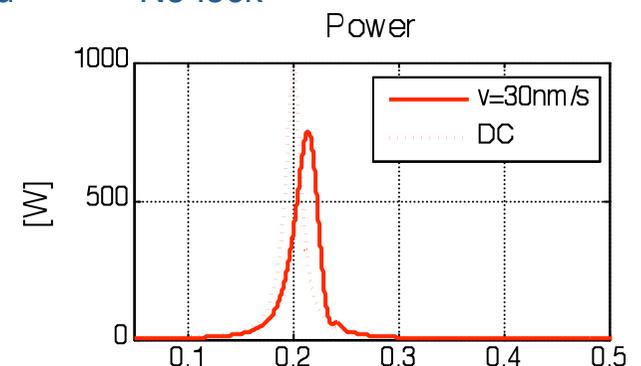


Raw error signal

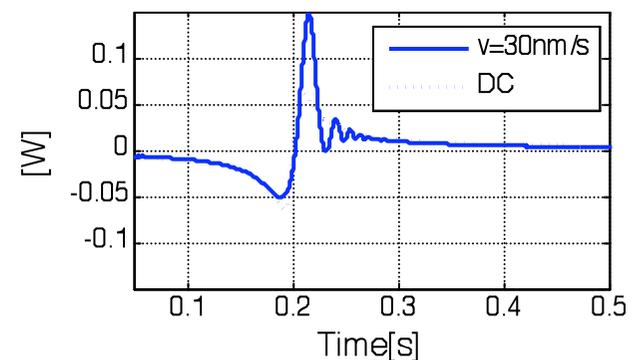


$v=30\text{nm/sec}$

No lock



Raw error signal



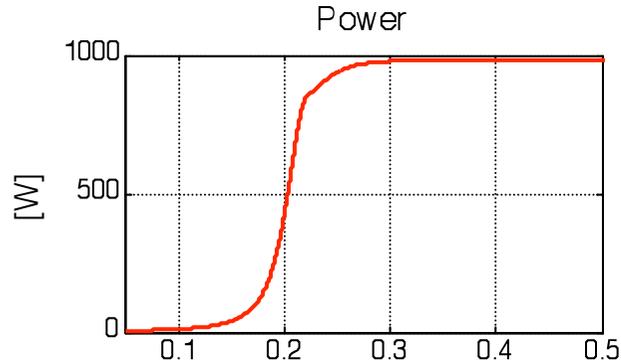
- 輻射圧が無視できるくらい小さいパワー(ロック時でキャビティー内パワー ~1kW)での計算
- 初速度 $v$ を与えロックできるかどうか調べる
- 相対ミラー速度が  $\sim 25\text{nm/sec}$ 以下ならロック可能 $\rightarrow$ ロックできるThresholdが存在する
- リンギングにより、エラーシグナルの符号が反転するのがロック失敗の原因
- リンギングはFinesseの2乗、キャビティー長の1乗に比例するので、Finesseを下げて、パワーリサイクリングゲインを上げる方が、ロックアクイジションには有利



# 透過光を使った線形領域の拡大(iLIGO, TAMA)

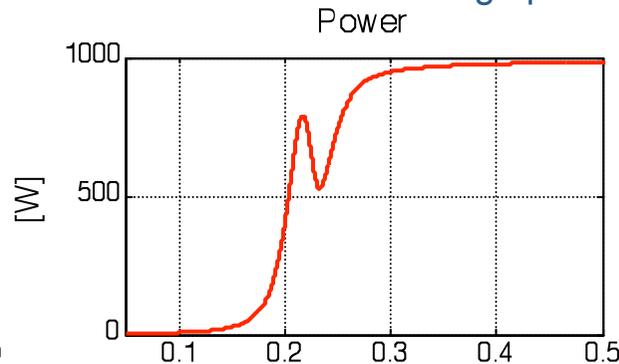
$v=20\text{nm/sec}$

Locked



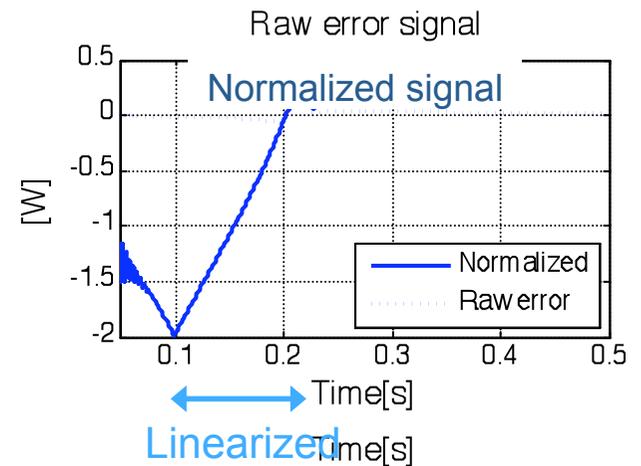
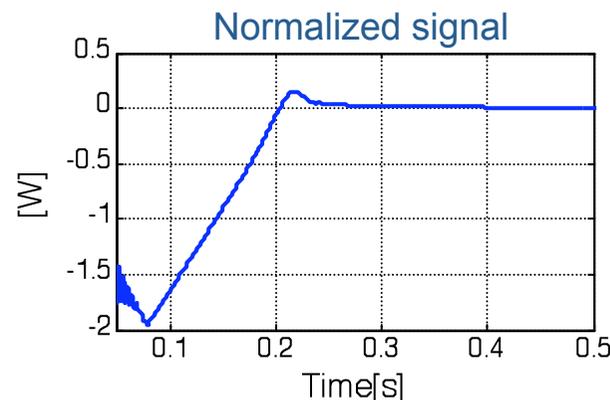
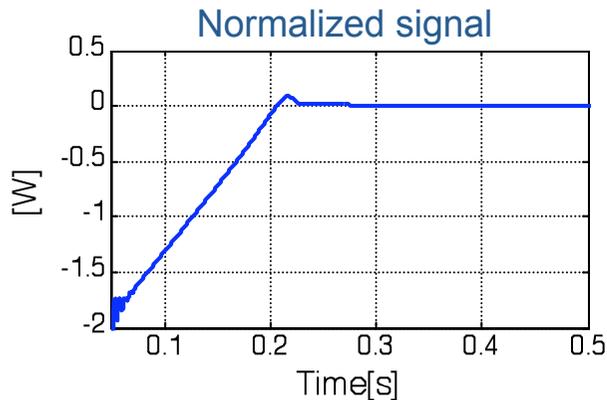
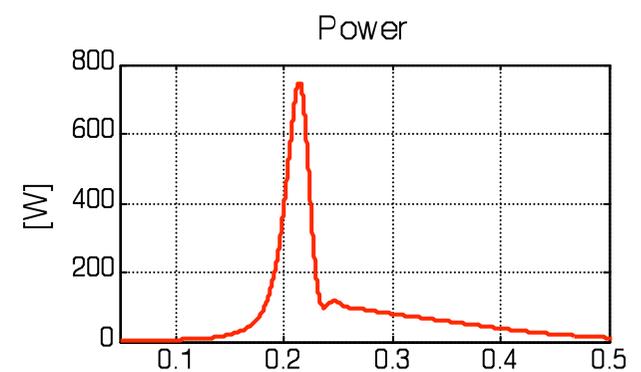
$v=25\text{nm/sec}$

Locked after a fringe passed

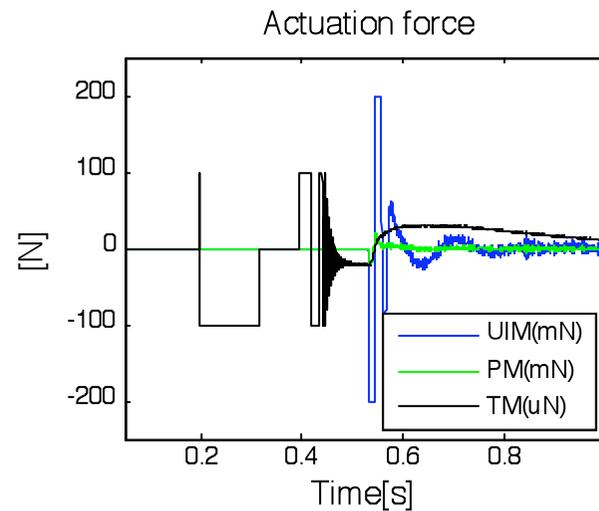
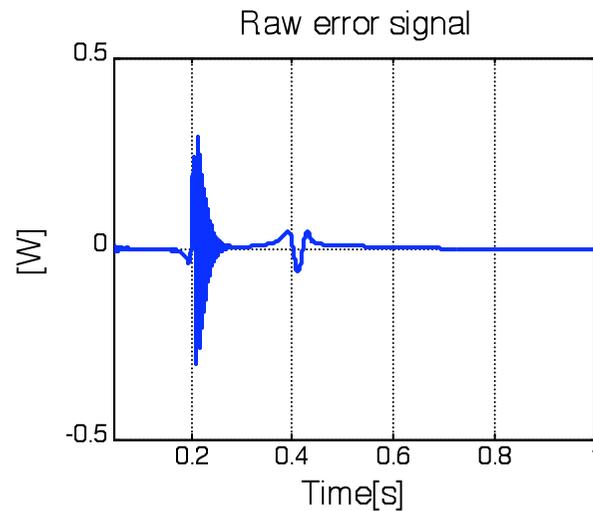
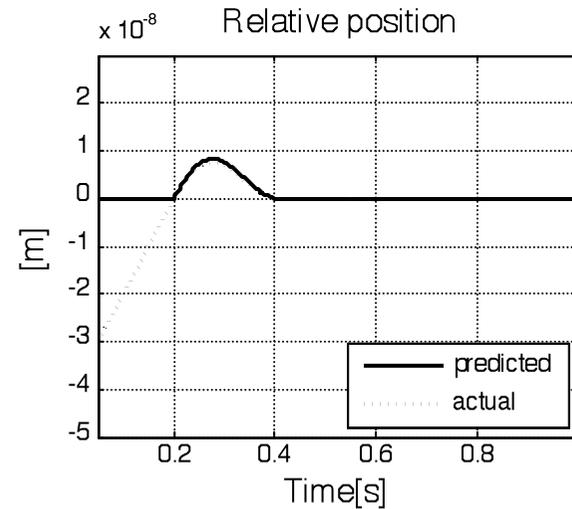
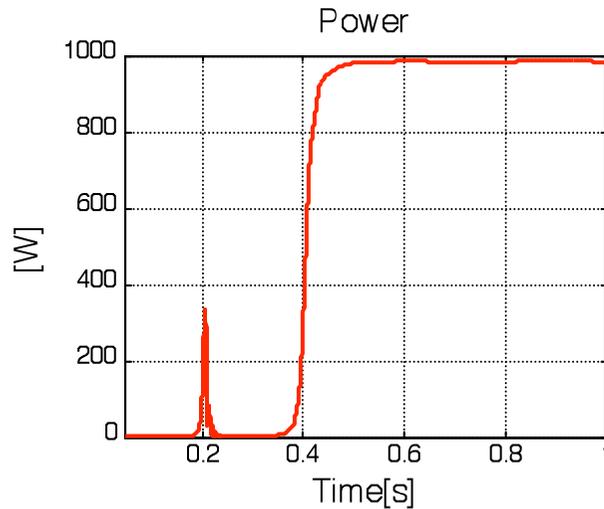


$v=30\text{nm/sec}$

No lock



- 線形化しても結果は変わらず、相対ミラー速度が  $\sim 25\text{nm/sec}$  以下でのみロック可能
- TAMAでかなりの効果があった、透過光による線形化では改善しない



- 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グングを始める。

- 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。

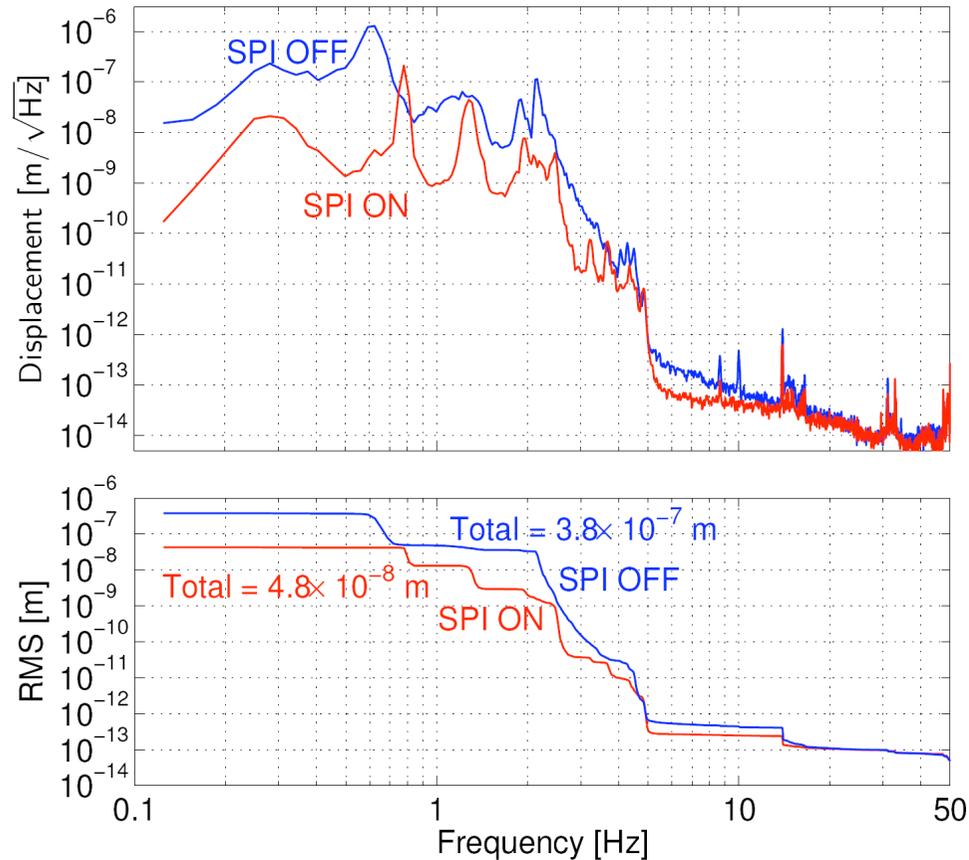
- このアルゴリズムにより500 nm/s (通常の誤差信号を使った場合より約25倍速い速度)の速い動きでもロックできる。

- 和泉君がTAMAで検証してくれた



# Suspension Point Interferometer (SPI)

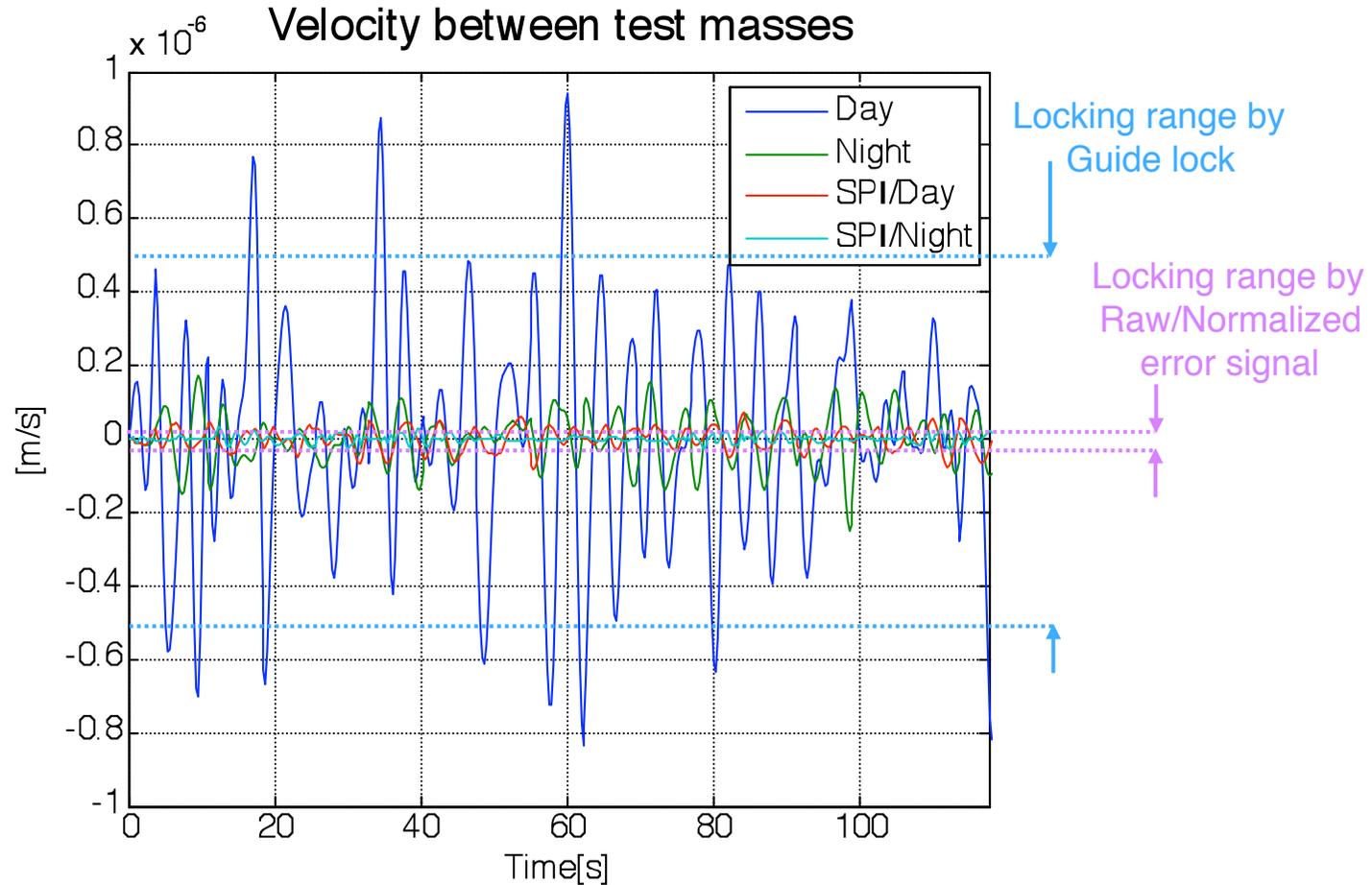
Y. Aso Ph.D thesis (2006)



- SPI 導入により地面振動はRMSで10分の1程度になる



# 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)



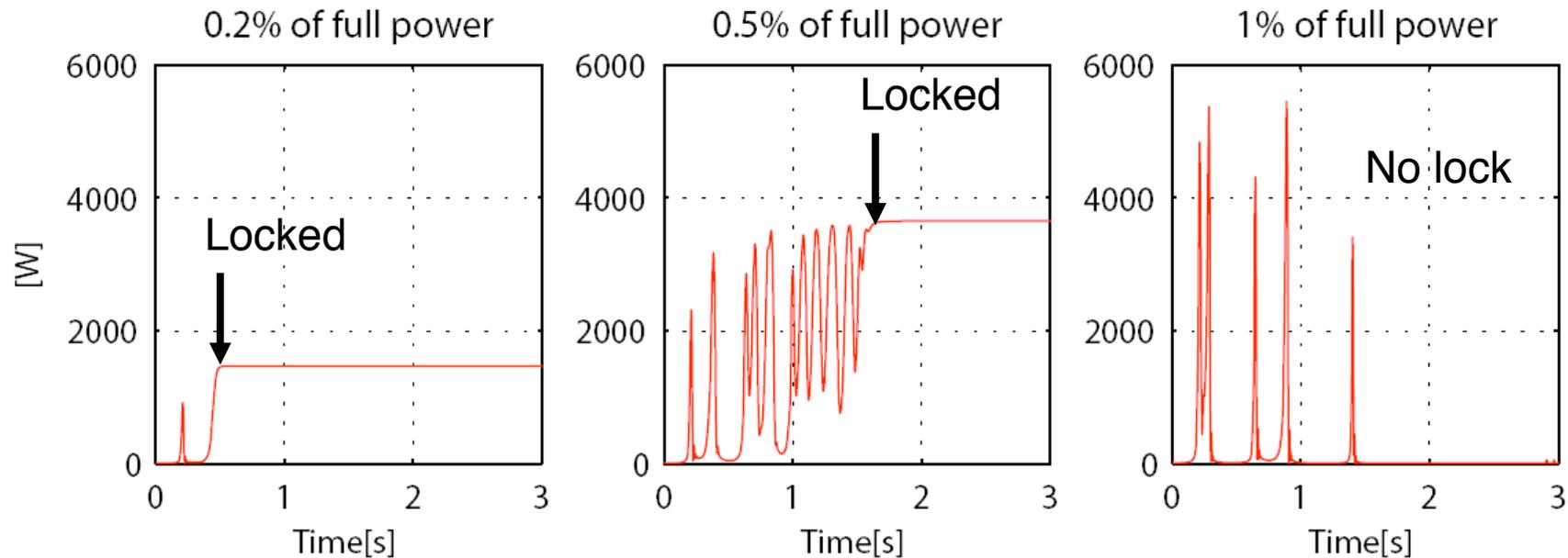
## ロックのまとめ

- 鏡が共振点を通じ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
- ただし、Guide lockのようなインテリジェントなロックはどうせいるので、それがあつ時のSPIの効果はそれほどでもない

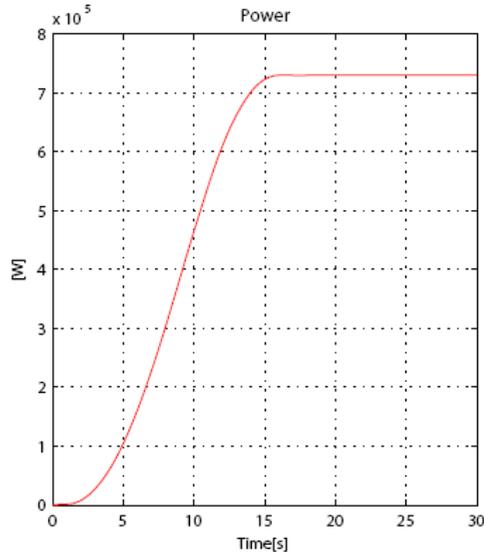
ここまでは輻射圧が無視できるほど低いパワーでのロックの話、次に輻射圧が効くようなハイパワーの場合を検証



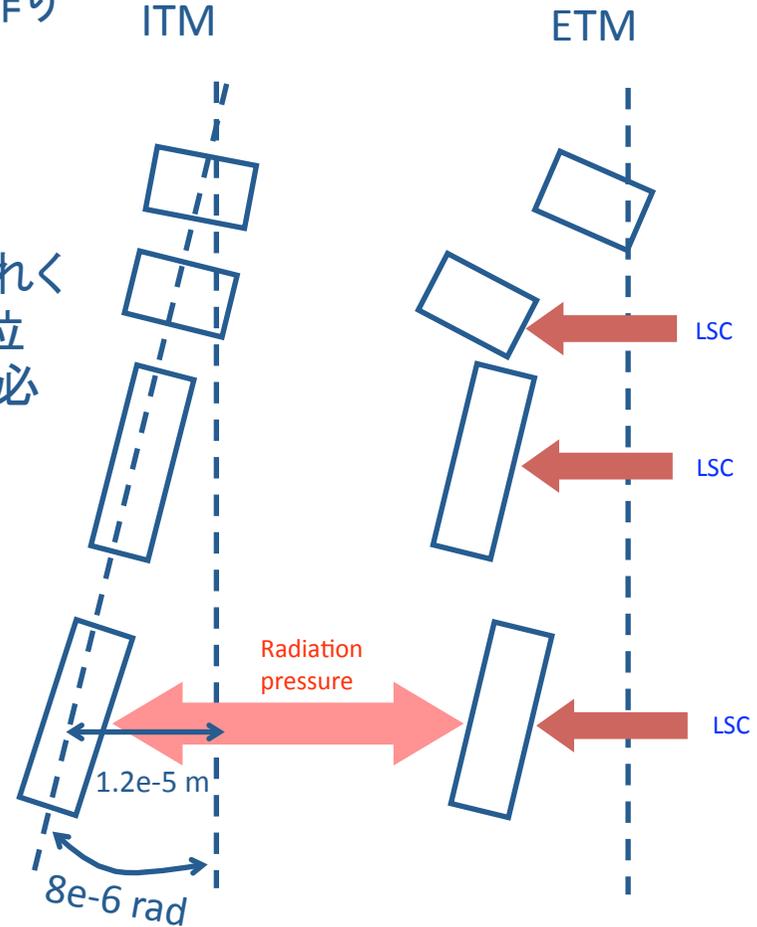
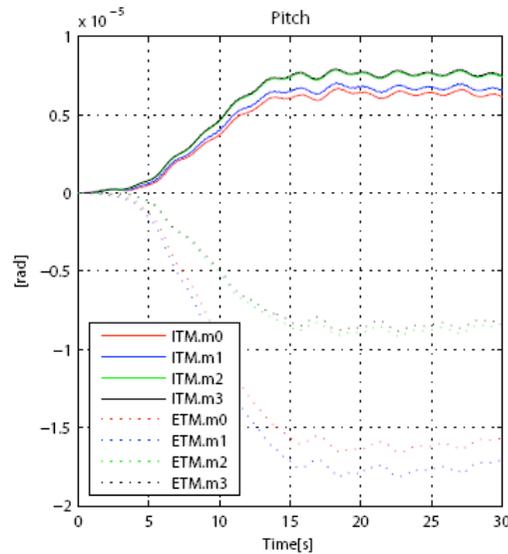
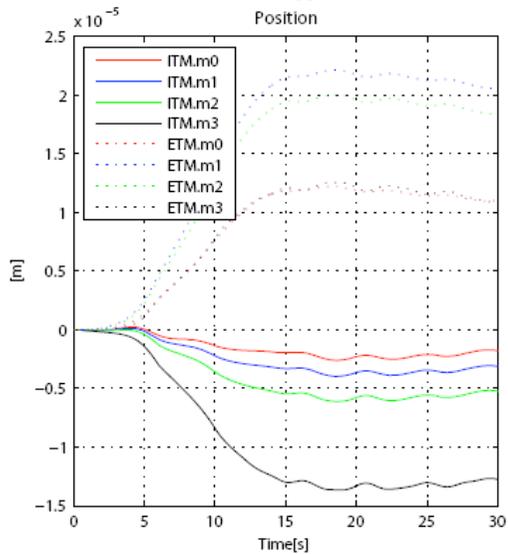
- 輻射圧により光軸方向に鏡が押されロックが邪魔される
- 最終的にたまるパワーは800kW程度
- しかしながらロック可能なパワーはわずか 数kW(0.5%程度)
- 40mの実験ではCARMにオフセットをつけることにより、フルロックの80分の1のパワーで5自由度ロックできた、なので、ロック時の入射パワーをフルパワーの40%以下に抑えれば大丈夫



# Quad suspension with radiation pressure (length)

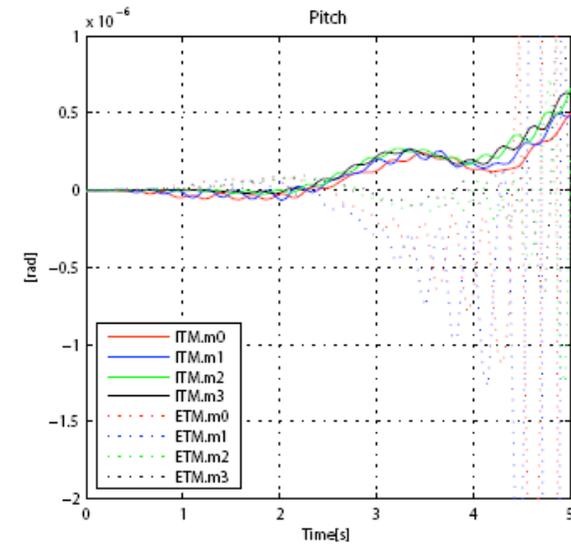
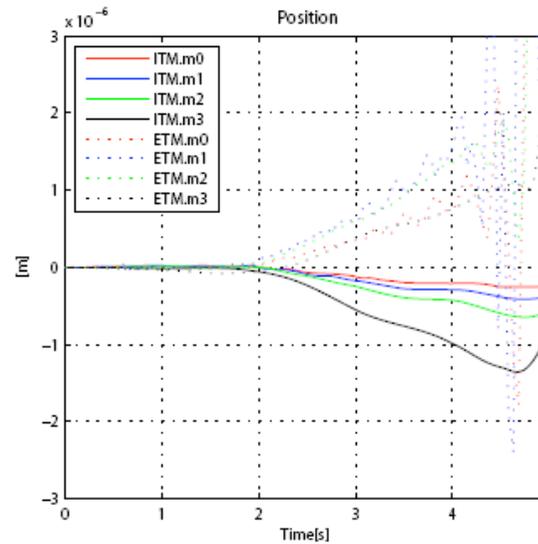
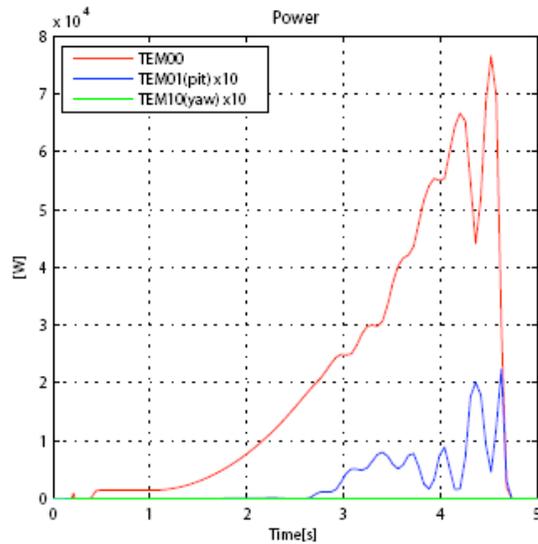


- 光路長制御に鏡の傾きが効かないような状況を作り出してみた
- 10 $\mu$ m程度鏡がシフトし、10rad程度傾く
- 光路長、角度制御にこれくらいの量を補正できる位のダイナミックレンジが必要

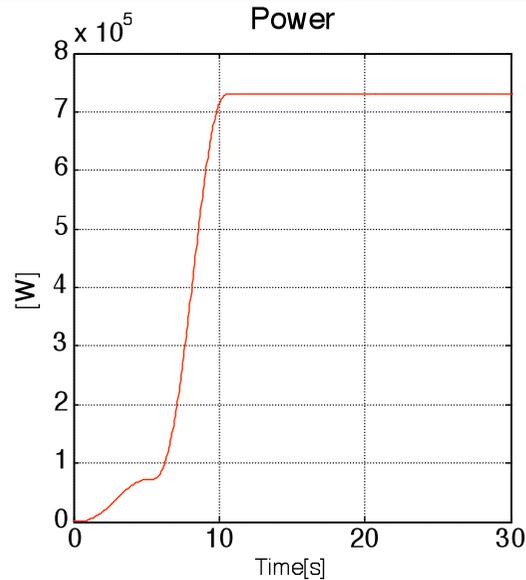




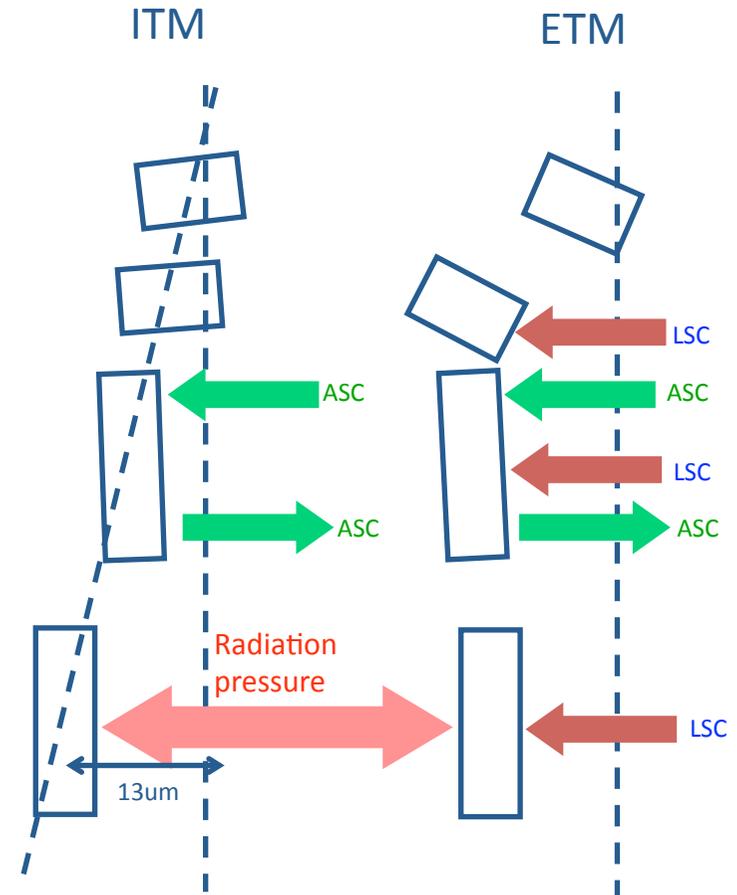
## Alignment instability with no ASC



- 角度揺れの影響を、光路長制御に関係するようにしてみる
- 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
- 角度制御が絶対に必要

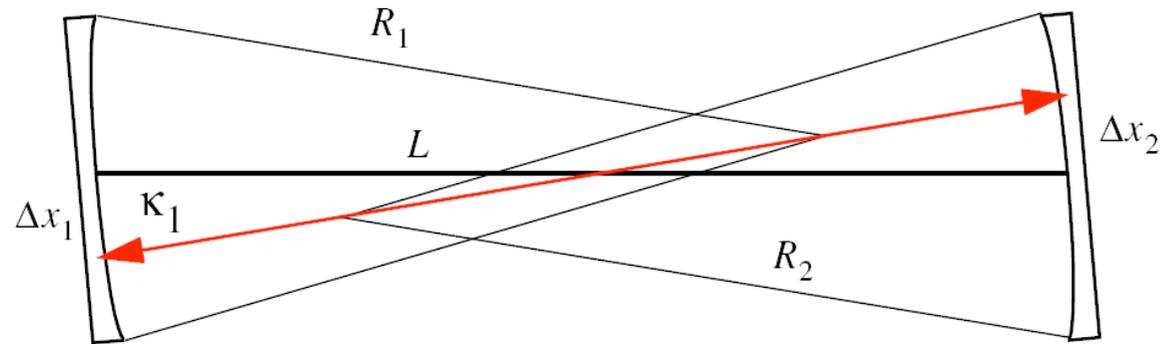


- 下から2段目のマスに $f^3$ のフィルターを用いた制御をかけ、最終段のマスを制御することにより、最終パワーまで持っていくことができる
- 更なる問題として、角度方向の光バネによる不安定性が出てくる
  - >> そのため、制御バンド幅を10Hz程度と大きくとらなければならない
  - >> Feedbackノイズによる感度の悪化が心配

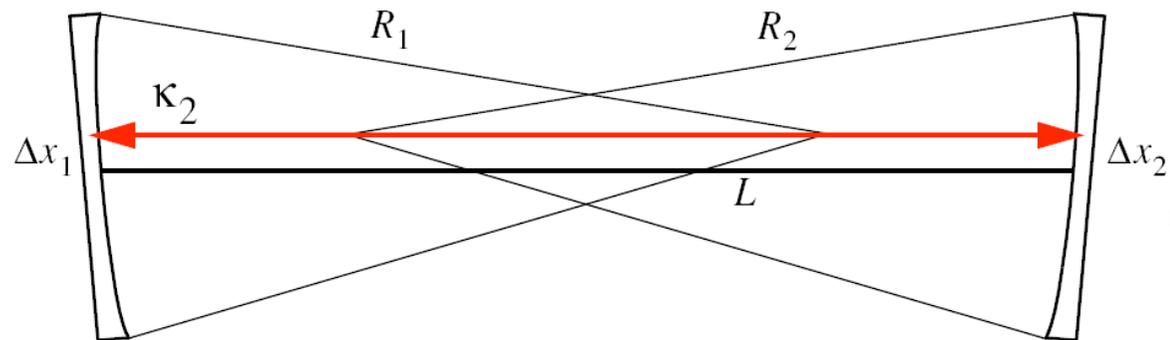




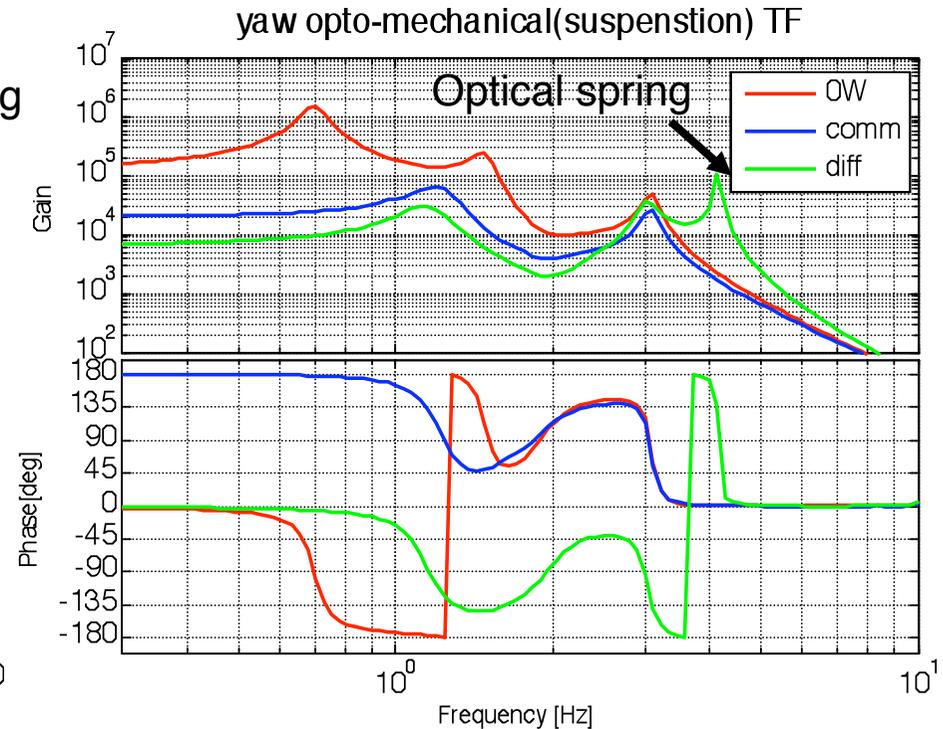
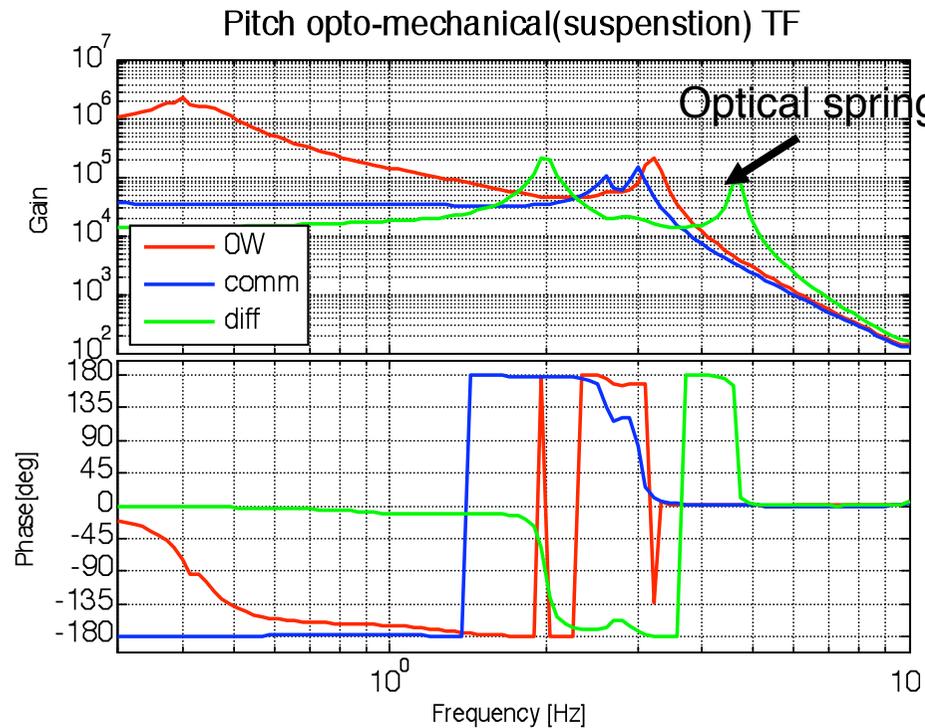
## Two modes of optical instability



Differential : stable -> spring



Common : unstable -> anti spring



- 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。



## Summary

- 長基線長、高フィネスキャビティのロックは、ミラーの速度によりリングング(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Guide lock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。
- ただしGuide Lockの効果が大きいいため、SPIをいれてもいれなくてもそれほどロックには影響ないと考えられる
- Guide LockがRSEに使えるかどうかは不明
- Finesseを下げて、パワーリサイクリングゲインを上げた方がロックアクイジションには有利
- 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
- LCGTをシミュレートする場合何が必要か
  - サスペンションのモデル(State Vector)、Mark Bartonに頼むか？