Livingston, Louisiana (L1)

TOBA開発の現状と 今後の展望(1)

中間報告会 2016.4.26

下田智文

L1 observed

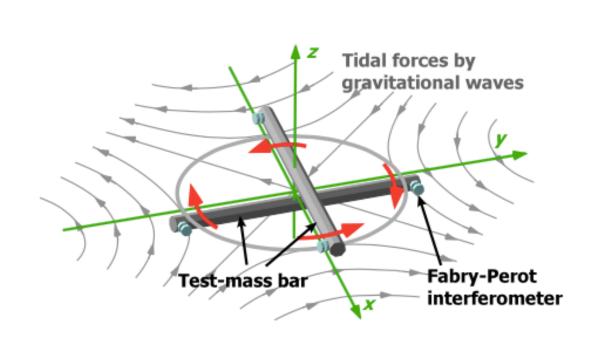
H1 observed (shifted, inverted)

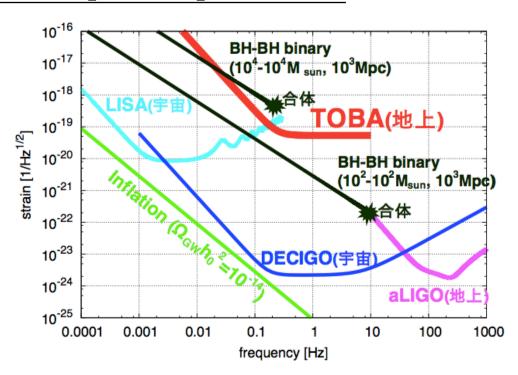
TOBAの概要

ねじれ振り子型重力波検出器TOBA

(TOrsion-Bar Antenna)

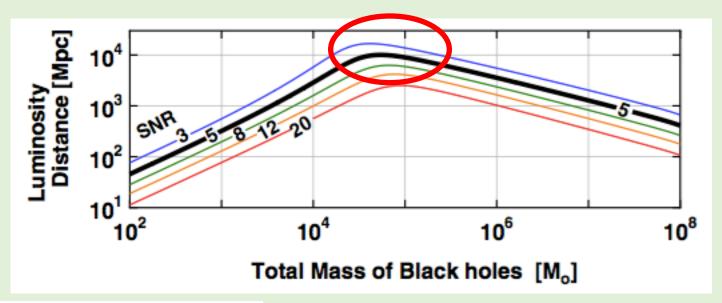
- 水平懸架したマスの回転を検出
- 共振周波数~mHz
 - 0.1Hz付近でも自由質点
- Final TOBA: 10mスケールで感度 h~10⁻¹⁹[Hz^{-1/2}] @0.1Hz

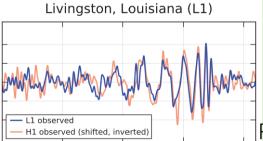




観測対象

中間質量ブラックホール連星合体(~1-10Gpc) ⇒大質量ブラックホール形成過程の解明

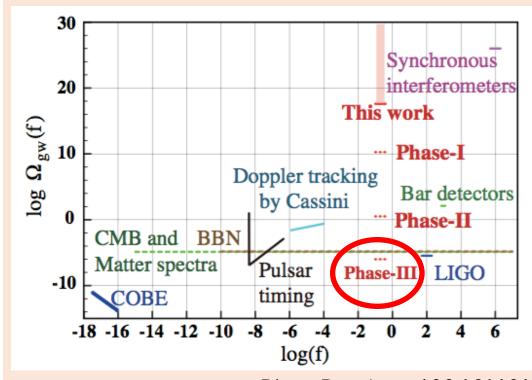




ブラックホール連星は意外と多い?

Phys. Rev. Lett. 116.061102

背景重力波(Ω_{GW}~10⁻⁷) ⇒初期宇宙の直接探査

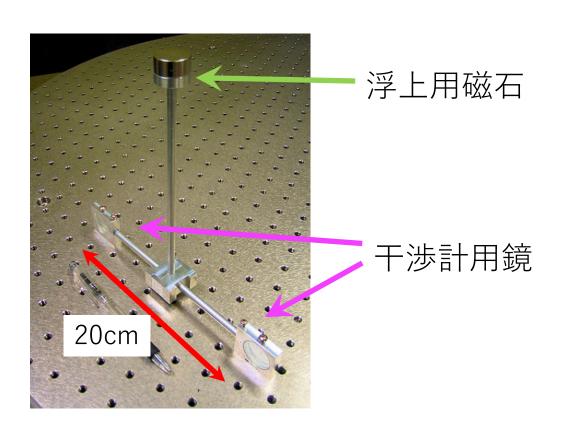


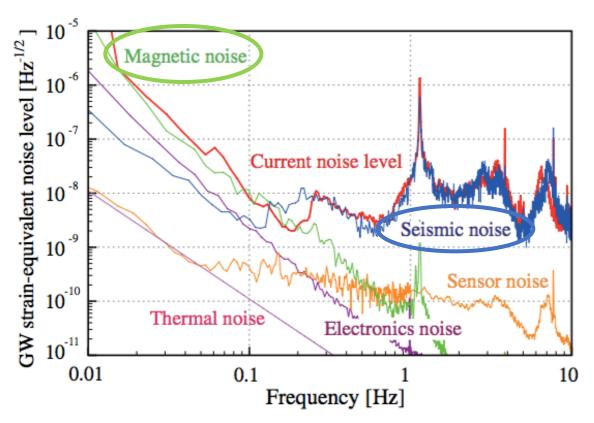
Phys. Rev. Lett. 106.161101

プロトタイプTOBA

- 超電導磁気浮上
- 感度 h~10⁻⁸[Hz^{-1/2}] @0.1Hz
 - 環境磁場変動 & 並進地面振動 リミット

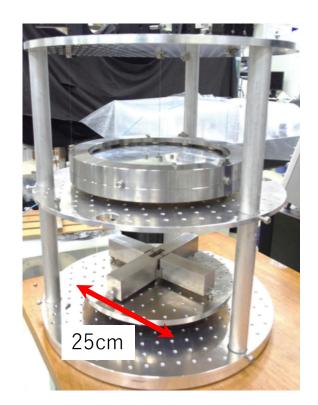
(Ishidoshiro et. al., 2011)

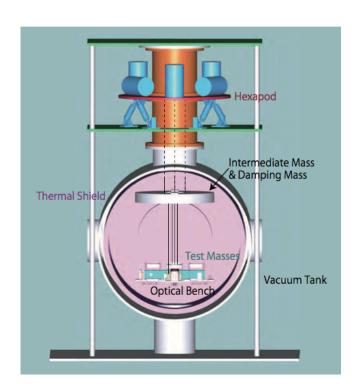


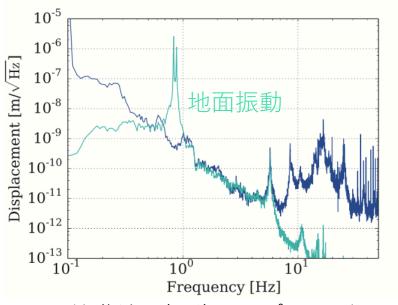


Phase-II TOBA

- ・ワイヤ懸架系
- 感度 h~10⁻¹⁰[Hz^{-1/2}] @5Hz
 - ・ 干渉計の位相雑音 & 並進地面振動 リミット

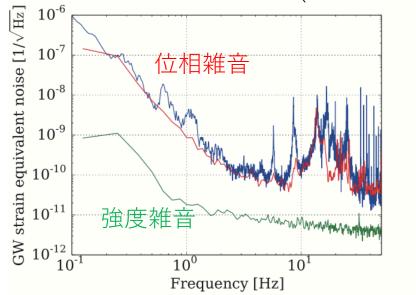






並進地面振動カップリング





干渉計の雑音(ファイバ光学系の振動?)

今後の開発(Phase-III)

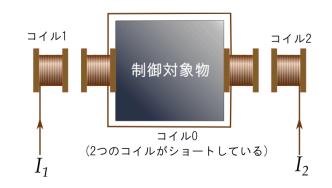
- ・ 環境磁場変動 → コイル-コイルアクチュエータの開発(有冨)
- 干渉計の雑音 → モノリシック光学系の開発(有冨)
- ・並進地面振動 → <u>カップリング低減方法の研究(下田)</u>
 低周波の並進防振系の開発(AVIT,IP,GASF,CoP)

h~10⁻¹²[Hz^{-1/2}] @0.1Hz 熱雑音リミット

• サスペンション熱雑音 \rightarrow Q値の高い(~10 7)ワイヤの開発(?)

h~10⁻¹⁵[Hz^{-1/2}] @0.1Hz 量子雑音リミット

- IMBH連星合体観測(10³M_{sun}で~1Mpc; 天の川銀河内)
- 背景重力波への制限 (Ω_{GW}^{-})



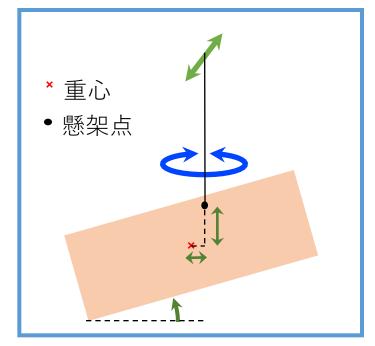
各雑音をこれ より小さく

並進地面振動カップリング

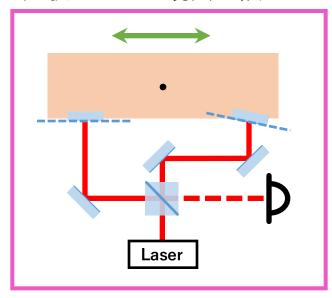
カップリング経路

- 5つの経路
 - □試験マスがYaw回転するもの
 - □干渉計の基線長が変動するもの

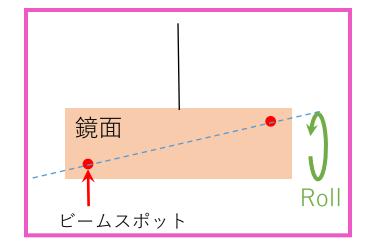
重心と懸架点のズレ



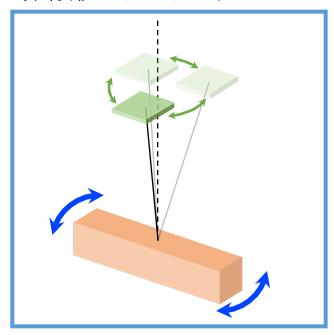
試験マス上の鏡面の傾き



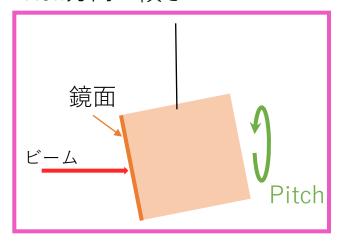
干渉計ビームの高さズレ



非線形カップリング

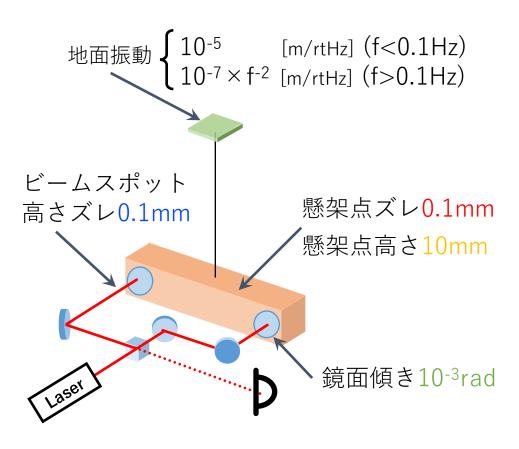


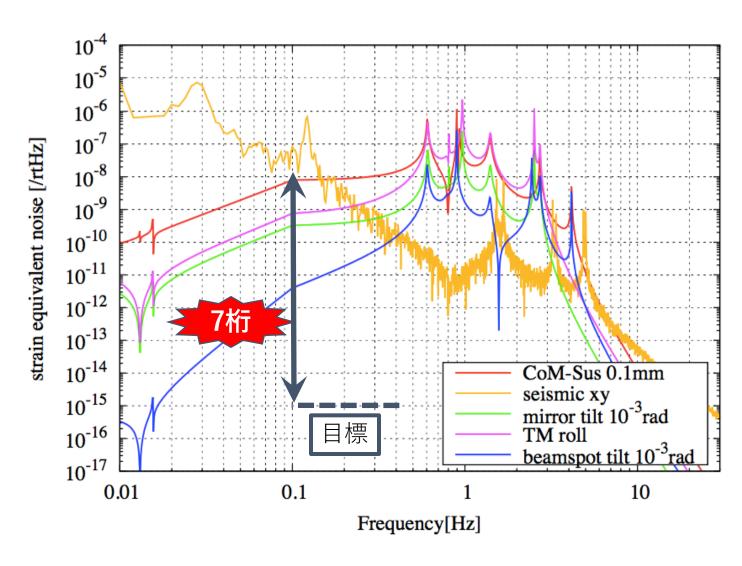
Roll方向の傾き



雑音レベル

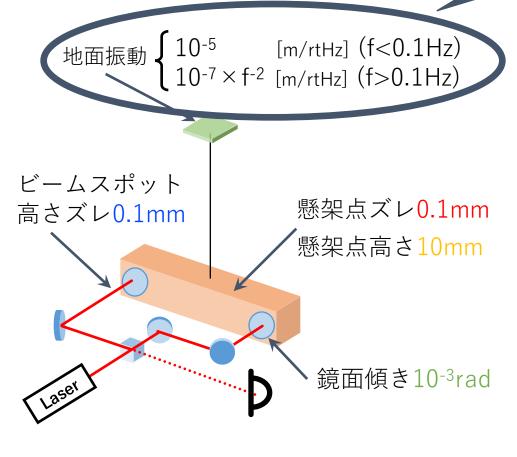
• 何も対策をしない場合



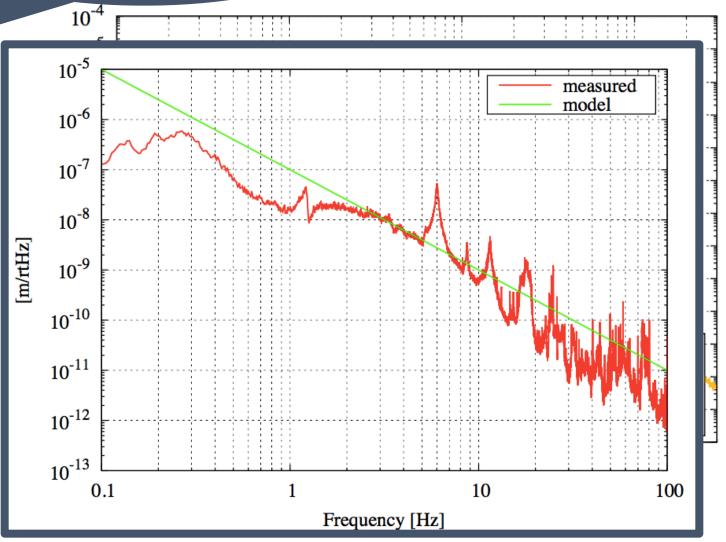


雑音レベル

• 何も対策をしない場合

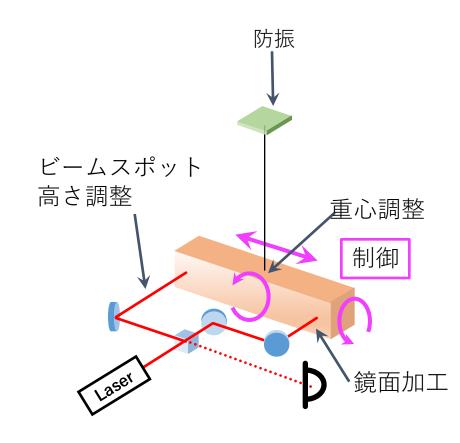


1~2桁大きく 見積もり過ぎた



カップリング対策

- 重心-懸架点ズレカップリング ←now
 - 重心位置10nm × 傾き調整で低減2桁
- 鏡面傾きカップリング
 - 鏡面加工(平行度10-6rad) × 相対並進・回転の制御~10-2
- 非線形カップリング
 - 試験マスPitch回転の制御
- ビームスポット傾き
 - ビームスポット高さ調整10 μ m × 相対Roll回転の制御
- Roll方向傾き
 - 重心位置調整相対Pitch回転の制御



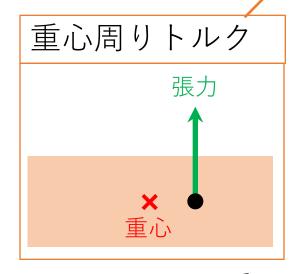


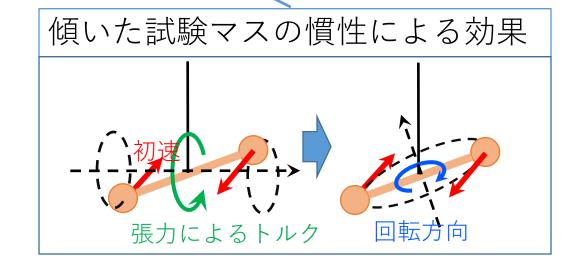
足りない分は防振へ(AVIT,IP,GASF,CoP)

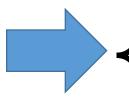
重心-懸架点ズレカップリング

• カップリング伝達関数

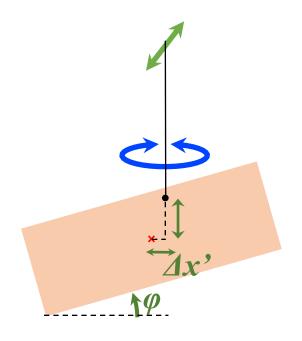
$$\frac{\widetilde{\theta}_{y}}{\widetilde{y}_{0}} \simeq \frac{\{I_{r}\Delta x' - \varphi(I_{y} - I_{r})\Delta z'\}M\omega^{4}}{(\kappa_{y} - I_{y}\omega^{2})(1 - \frac{l}{g}\omega^{2})(Mg\Delta z' - I_{r}\omega^{2})}$$

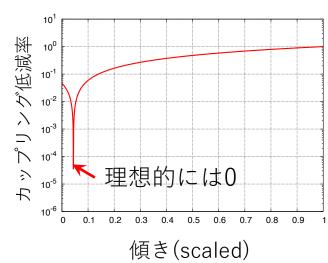






重心位置調整によりズレ・傾きを低減傾き調整により と を打ち消す(右)

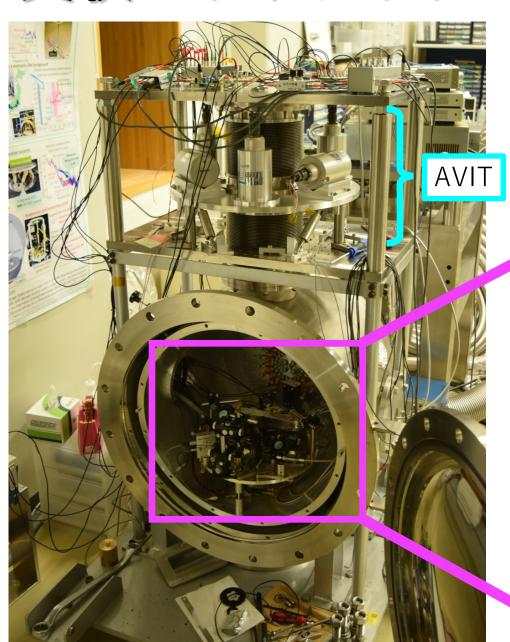




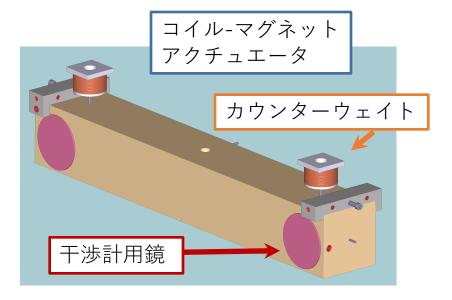
低減実験

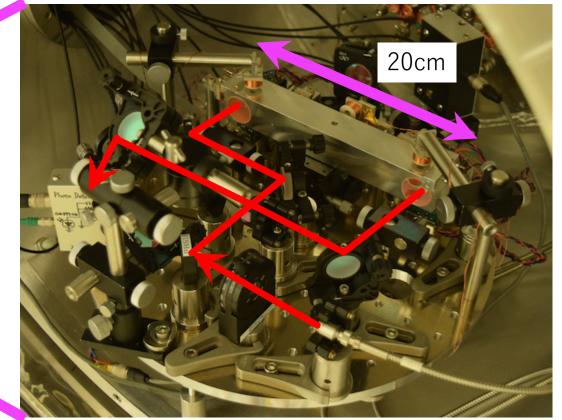
• 傾き調整によりカップリング率の低減を実証 **AVIT** - カップリング伝達関数を計測 加振 試験マス回転角への コイル-マグネット 伝達関数を計測 アクチュエータ カウンターウェイト マイケルソン干渉計 ---Optical Bench 今回は地面に固定

実験セットアップ



実験用テストマス (アルミ,20cm)





進捗

• AVITのピエゾが壊れて加振できない ケーブル接合部分の断線? by PIの人

ダミー足を製作

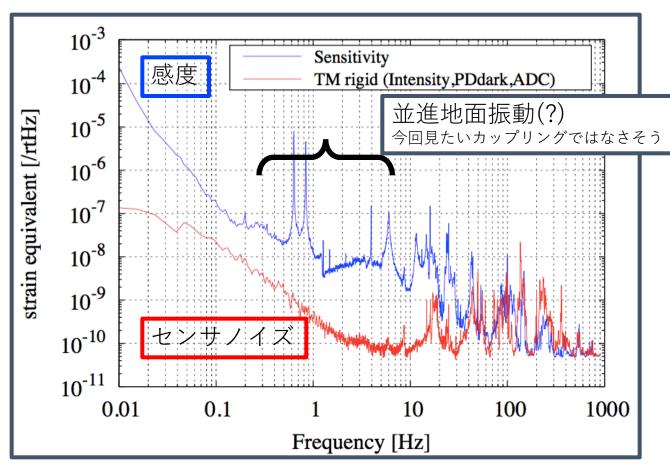
ノイズレベル →

- 0.3Hz以下:謎

- 0.3~10Hz:並進地面振動?

- 10Hz以上:センサノイズ

(光学系の振動?)



不安要素

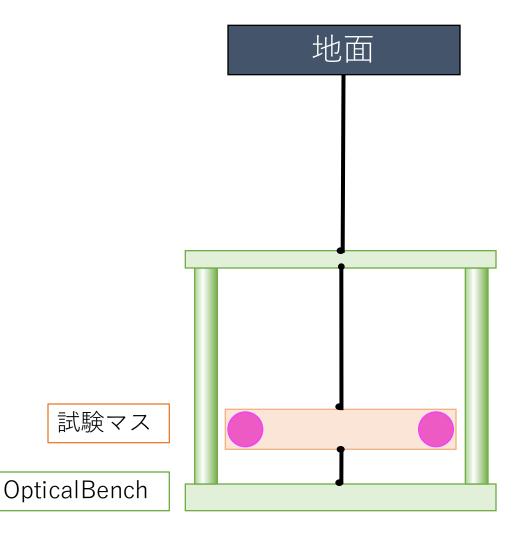
- カウンターウェイトによる調整は現実的か
 - 調整のたびにマスに接触しなければならない
- 多自由度制御による雑音の悪化を抑えられるか
 - カップリング低減にはYaw以外の相対並進・回転も制御で抑える必要がある (Yaw以外に3自由度)
 - ・制御の少ない低減方法はないか?

その他改良の可能性 (検討中)

- ・上下吊りねじれ振り子
 - 懸架点ズレカップリングの低減

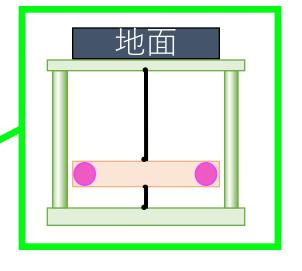
$$\frac{\widetilde{\theta}_{\rm y}}{\widetilde{y}_0} \simeq \frac{\{I_{\rm r}\Delta x' - \varphi(I_{\rm y} - I_{\rm r})\Delta z'\}M\omega^4}{(\kappa_{\rm y} - I_{\rm y}\omega^2)(1 - \frac{l}{g}\omega^2)(Mg\Delta z' - I_{\rm r}\omega^2)}$$

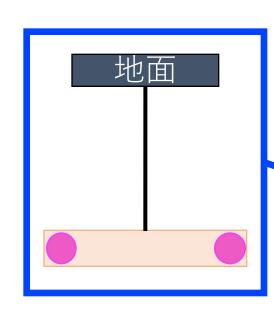
- 鏡面傾きからのカップリング低減
 - 並進,Roll,Pitch方向を固くする
- 回転の共振周波数は上がってしまう
 - 他の雑音的には嬉しくない
- ビームの高さ調整でカップリング低減

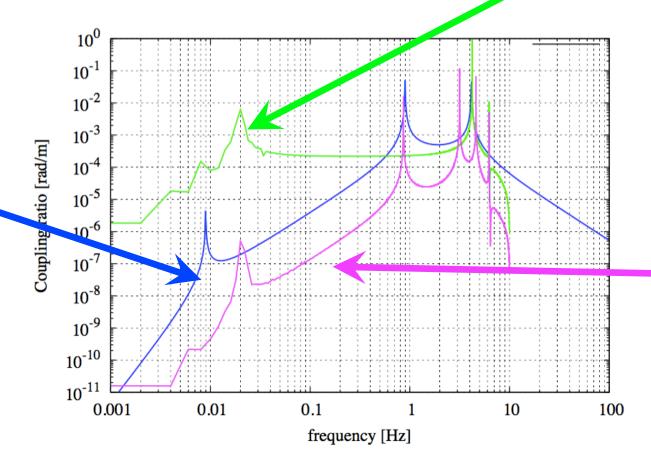


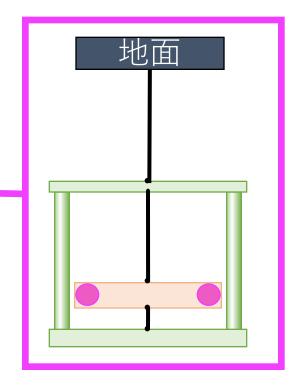
上下吊りねじれ振り子

カップリング率比較 (重心ズレ1μmの場合)



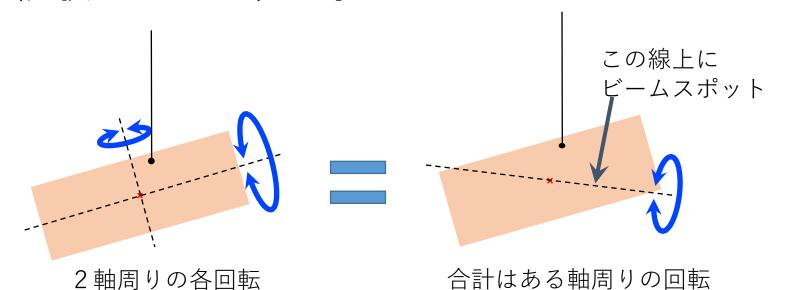




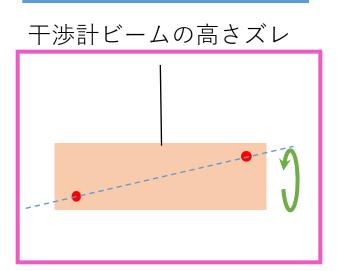


ビームの高さ調整でカップリング低減

地面に固定した座標系ではなく、 試験マスを基準に考える



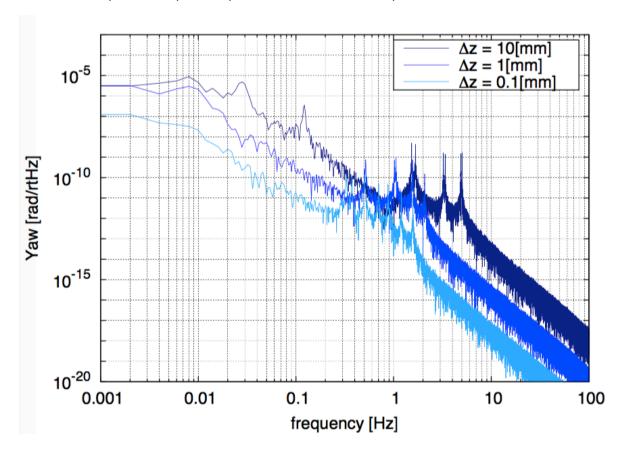
重心と懸架点のズレ
* 重心
* 懸架点



おわり

非線形カップリングの低減

- 懸架点を低くする
 - (雑音) ∝ (懸架点高さ)1~2



Roll回転を制御で抑制 (UGF40Hz,DCゲイン650の場合)

